

蘇澳港防波堤改善工程規劃

第六子計劃

港池振盪數值之模擬

李兆芳 莊文傑

委託單位：省交通處基隆港務局蘇澳港分局

承辦單位：省交通處港灣技術研究所

協辦單位：國立成功大學水利及海洋工程研究所

中華民國八十六年二月

第六子計劃

港池振盪數值之模擬

計劃主持人：國立成功大學

水利及海洋工程研究所

教授 李兆芳博士

共同主持人：港研所數學模式組

副研員 莊文傑博士

候選人

摘要

本計畫研究主旨乃針對蘇澳港池地形作港池振盪之數值計算，了解蘇澳港域之波浪特性，並對於改善工程提出改進規畫方案，作為今後港域運轉維護之重要參考。目前依照計畫進度已完成的所有工作項目，包括現場資料收集、數值模式發展、計算條件之確立、計算蘇澳港港池波浪特性、建議改善方案等。

海氣象資料方面，冬季季節風向以西北西、西北向為主，夏季季節風向則以東南東、南、與南南東為主，平均每年約有 2 個颱風侵襲蘇澳港附近海域。港域較大波浪主要由東～東南方傳入，而週期在 2 ~ 25 秒的波浪均可能在蘇澳港區內造成港池振盪現象。

數值模式採用混合有限元素法將海域分為外海等水深區與港內不等水深區兩個計算領域進行模式的發展，並選取一矩形等水深港池進行測試計算，經與過去學者不同模式計算結果或試驗結果進行比較，驗證本計畫建立模式之正確性。由於模式已考量了港池不等水深的影響，預期本模式計算蘇澳港港池振盪亦能得到合理的結果。模式計算所需的條件依據目前收集的資料顯示，入射波浪條件將以SE、SSE、NE為主要入射方向；波浪計算週期則以10~160秒之中、長週期的大浪為範圍。

本研究計畫各工作項目均依預定進度順利完成，所完成成果為：1. 瞭解現況港池振盪波浪分佈情形，2. 計算改善方案對於港池安定性影響結果，3. 建議今後改善港池安定性遠程工作方向，作為長期監測規畫考量之參考。

目 錄

摘要	I
目錄	II
圖目錄	IV
第一章 前言	1
1-1 計畫背景與主旨	1
1-2 工作目標及完成項目	1
第二章 自然條件概述	2
2-1 地文資料	2
2-1-1 地理位置	2
2-1-2 平面配置	4
2-1-3 地形及地質	4
2-2 海氣象條件	4
2-2-1 氣象資料	5
2-2-2 海象資料	7
第三章 模式建立說明	7
3-1 模式建立	7
3-1-1 基本方程式與邊界條件	7
3-1-2 有限元素法	7
3-2 模式測試	12
第四章 模擬計算、結果與討論	13
4-1 現況模擬計算條件	13
4-2 現況模擬結果	14

4-3	改善方案模擬	15
4-4	改善方案說明	16
第五章	結論與建議	18
參考文獻		60

圖目錄

圖2-1-1	蘇澳港地理位置圖	19
圖2-1-2	澳港平面配置圖	20
圖2-1-3	蘇澳港水深示意圖	21
圖3-1-1	混合有限元素法區域分割示意圖	22
圖3-2-1	矩形港池三角形元素分割示意圖	23
圖3-2-2	矩形港池底端中點處擴大率 R 與無因次波數 $k_0 l$ 相關曲線圖	23
圖4-1-A	模式計算選取範圍示意圖	24
圖 4-1-1	蘇澳港港池岸壁數值計算消波係數	25
圖 4-1-2	蘇澳港現況有限元素格網	26
圖 4-2-1a	蘇澳港現況港池波浪分佈(T=20sec, SE)	27
圖 4-2-1b	蘇澳港現況港池波浪分佈(T=20sec, SSE)	28
圖 4-2-1c	蘇澳港現況港池波浪分佈(T=20sec, NE)	29
圖 4-2-2a	蘇澳港現況港池波浪分佈(T=26sec, SE)	30
圖 4-2-2b	蘇澳港現況港池波浪分佈(T=26sec, SSE)	31
圖 4-2-2c	蘇澳港現況港池波浪分佈(T=26sec, NE)	32
圖 4-2-3a	蘇澳港現況港池波浪分佈(T=65sec, SE)	33
圖 4-2-3b	蘇澳港現況港池波浪分佈(T=65sec, SSE)	34
圖 4-2-3c	蘇澳港現況港池波浪分佈(T=65sec, NE)	35
圖 4-2-4a	蘇澳港現況港池波浪分佈(T=160sec, SE)	36

圖 4-2-4b	蘇澳港現況港池波浪分佈(T=160sec, SSE)	-----	37
圖 4-2-4c	蘇澳港現況港池波浪分佈(T=160sec, NE)	-----	38
圖 4-2-5	蘇澳港現況 4 號碼頭波浪反應曲線 (a.波浪 SE 方向 b.波浪 SSE 方向 c.波浪 NE 方向)	-----	39
圖 4-2-6	蘇澳港現況 5 號碼頭波浪反應曲線 (a.波浪 SE 方向 b.波浪 SSE 方向 c.波浪 NE 方向)	-----	40
圖 4-2-7	蘇澳港現況 8 號碼頭波浪反應曲線 (a.波浪 SE 方向 b.波浪 SSE 方向 c.波浪 NE 方向)	-----	41
圖 4-2-8	蘇澳港現況 9 號碼頭波浪反應曲線 (a.波浪 SE 方向 b.波浪 SSE 方向 c.波浪 NE 方向)	-----	42
圖 4-2-9	蘇澳港現況 12 號碼頭波浪反應曲線 (a.波浪 SE 方向 b.波浪 SSE 方向 c.波浪 NE 方向)	-----	43
圖 4-2-10	蘇澳港現況 13 號碼頭波浪反應曲線 (a.波浪 SE 方向 b.波浪 SSE 方向 c.浪 NE 方向)	-----	44
圖 4-3-1	蘇澳港本研究改善配置圖	-----	45
圖 4-3-2	蘇澳港本研究改善方案有限元素格網	-----	46
圖 4-3-3	蘇澳港本研究改善方案 4 號碼頭波浪反應曲線 (a.波浪 SE 方向 b.波浪 SSE 方向 c.波浪 NE 方向)	-----	47
圖 4-3-4	蘇澳港本研究改善方案 5 號碼頭波浪反應曲線 (a.波浪 SE 方向 b.波浪 SSE 方向 c.波浪 NE 方向)	-----	48
圖 4-3-5	蘇澳港本研究改善方案 8 號碼頭波浪反應曲線 (a.波浪 SE 方向 b.波浪 SSE 方向 c.波浪 NE 方向)	-----	49
圖 4-3-6	蘇澳港本研究改善方案 9 號碼頭波浪反應曲線 (a.波浪 SE 方向 b.波浪 SSE 方向 c.波浪 NE 方向)	-----	50

圖 4-3-7	蘇澳港本研究改善方案 12 號碼頭波浪反應曲線 (a. 波浪 SE 方向 b. 波浪 SSE 方向 c. 波浪 NE 方向)	----- 51
圖 4-3-8	蘇澳港本研究改善方案 13 號碼頭波浪反應曲線 (a. 波浪 SE 方向 b. 波浪 SSE 方向 c. 波浪 NE 方向)	----- 52
圖 4-4-1	蘇澳港遠期規劃改善方案配置圖	----- 53
圖 4-4-2	蘇澳港遠期規劃改善方案於商港一之波浪反應曲線圖	----- 54
圖 4-4-3	蘇澳港遠期規劃改善方案於商港二之波浪反應曲線圖	----- 55
圖 4-4-4	蘇澳港遠期規劃改善方案於輸煤碼頭區之波浪反應曲線圖	---- 56
圖 4-4-5	蘇澳港遠期規劃改善方案於北方澳軍港區內之波浪反應曲線圖	57
圖 4-4-6	蘇澳港遠期規劃改善方案與現況配置於 12 和 13 號碼頭區颱風 波浪譜比較圖	----- 58
圖 4-4-7	蘇澳港遠期規劃改善方案與現況配置於 12 和 13 號碼頭區颱風 波浪譜比較圖(颱風過後)	----- 59

第一章 前言

1-1 計畫背景與主旨

蘇澳港位於台灣東部海岸，東臨太平洋。因地理位置、地形、海洋與大氣環境的影響，此地區經常受到暴潮、颱風波浪的侵襲，對於港口護岸設施之安全性及海港操船營運的效率均有很大的影響。蘇澳港屬岩岸港口且內部碼頭大部份為直立式，因此傳入港內的波能不易消散，波浪在港域內交互傳遞相疊，造成盪漾現象。基隆港務局為解決蘇澳港內消波問題進行改善工程研究，其中第一期計畫考量港區原有的港池配置，設置消波堤減緩港域港池振盪的問題；第二期改善工程則基於蘇澳港整體發展的考量，在港區外設置防波堤，以改變港口方向並增加遮避效果。目前第一期改善工程已完竣，港域現今配置與原有港池不同，港區內之振盪特性也有所改變，若能掌握蘇澳港各區港池振盪現象，則可以提供改善工程作適當地規劃修正。因此本文研究主旨乃針對蘇澳港池地形作港池振盪之數值計算，以了解蘇澳港域之波浪特性，並對於改善工程提出改進規畫方案，作為今後港域運轉維護之重要參考。

1-2 工作目標及完成項目

港池振盪計算主要目的在瞭解波浪進入港池後，受到港池幾何形狀、水深變化、港口設施、以及港池邊壁之影響，在港內之分佈情形。由於各種不同頻率的波浪進入港池，波浪的頻率可能和港池之自然振動頻率接近而產生所謂“共振”現象，使得港內某位置可能發生波高異常變大的情形，造成港池不穩定。計畫將以蘇澳港港池振盪數值計算為著眼，利用數值模式配合現有蘇澳港海域之現場觀測資料，計算港池振盪之情形，探討港池不安定的原因，並藉以校驗數值模式。計畫執行期間亦將研擬可行之改進方案，配合數值計算結果，檢討各改進方案的優劣，提供作為蘇澳港改善工程修正參考。

計畫執行為期一年，計畫之工作項目包含現場資料之收集、數值模式的發展、確立計算條件並建立模式格網、分析計算結果、研擬改善方案並討論其優劣、提出可行之修正方案建議等。依照工作進度，必須於第六個月提出期中計畫進度報告，說明計畫工作進度狀況。第十二個月提出期末報告書。本研究計畫各工作項目均依預定進度順利完成，所完成成果為：

1. 計算分析蘇澳港港池現況波浪入侵港域波浪分佈情形，
2. 建議改善方案對蘇澳港港池穩定性影響情形，
3. 建議今後蘇澳港改善港池安定性遠程工作方向，及長期監測規劃之考量。

第二章 自然條件概述

本子題計畫的工作目標乃建立數值模式計算蘇澳港港池穩定狀況，以提供改善工程重要的參考依據。模式的建立除了所引用理論合理性外，模式計算所需的基本條件亦必須正確詳實。因此，自然資料的收集為不可或缺且重要的一環。依照本計畫的需求，所需的資料包括了地文、氣象及海象資料等。

2-1 地文摘要

2-1-1 地理位置

蘇澳港位於台灣東海岸北端之蘇澳灣中，宜蘭縣蘇澳鎮東南方約 2 公里處，北距基隆港約五十哩，南離花蓮港約四十哩（圖 2-1-1），與內埤漁港為台灣東北部之漁業重鎮。蘇澳灣為南、北方澳之山岬所形成的天然岬灣，北、西、南三面環山，灣口朝東南方臨太平洋，蘇澳港即是依此地形所闢建的半天然港口。

2-1-2 平面配置

蘇澳港平面配置如圖 2-1-2 所示。港區包括了北方澳、蘇澳及南方澳三部分，北方澳位於港區北側，現屬軍用港區，南側為南方澳漁港，西側為蘇澳鎮，是蘇澳港的主要部分。港口開口朝東南方，南、北各有一外廓防波堤阻擋來自太平洋方向的波浪。港灣內西北側，則有圳頭溪經蘇澳鎮區流入灣中。在溪流出海口與商港、軍港區之間則有供船舶迴轉之迴船池區。目前共有 13 座深水碼頭可供船舶繫靠、裝卸、停泊之用。為了消除港內因共振現象所產生的港池振盪問題，目前已於軍港區西側，與北側內防波堤頂端加築防波堤，以改善區內的港池不穩定現象。未來擬於外廓防波堤外，分別在北方澳及南方澳岬端構築新的外廓防波堤，除作為未來闢港所

需，亦期能解決蘇澳港區港池振盪的問題。

2-1-3 地形及地質

台灣東部海岸大部分為岩質地形，蘇澳港恰位於此東部海岸之北端，為台灣東部砂、岩岸之分界點。蘇澳港以北由頭城至南方澳北側，川流散佈其間，蘭陽溪、新城溪每年提供大量輸砂，形成長約 30 公里的砂質海岸，平均海底坡降在 $1/75 \sim 1/100$ 左右；蘇澳港南側至花蓮港則多為岩質海岸，海底坡降約在 $1/40 \sim 1/50$ 之間。根據地質鑽探資料分析結果，蘇澳港灣內地質在 3m 至 10m 深度為砂層地質，除靠近蘇澳溪出口與南方澳防沙堤附近為河川輸砂沉積外，多為灰色岩層，蘇澳灣北、西、南山地地質則大多為頁岩或粘板岩。

港域內水深 5m、10m、20m 等深線分佈如圖 2-1-3 所示，停泊碼頭水深約在 7~12m 左右，迴船池區平均水深約 14~15m。整體而言，蘇澳港區包括北側軍港區與商港區範圍水深大都在 14~20m，地形變化不大，唯靠近圳頭溪流出口附近海岸到港區的水深變化較大，而南方澳漁港水深則不到 5m 深度。

2-2 海氣象條件

2-2-1 氣象資料

台灣位處亞熱帶地區，一年的氣候大致可分為夏、冬二季，冬季主要受到大陸高氣壓的影響，東北季風盛行；夏季則受太平洋高氣壓與低壓氣旋（即颱風）的影響，屬夏季季風氣候。蘇澳港位於台灣東海岸北端，面向太平洋，因此受到夏季颱風與東北季風的直接影響。

象資料包含了氣溫、氣壓、雨量、風、濕度等。其中影響蘇澳港操船營運則以降雨及風最為重要。降雨方面，依據氣象局測候站與台電水文站長年各月降雨量紀錄，蘇澳地區各月平均雨量以 9 ~ 11 月較多，在 600mm 以上，其他月份則約在 100mm ~ 400mm 之間。至於風況方面，根據北方澳軍方測候站風速與風向資料，以及台電於 74 年 8 月在三仙台為期一年的觀測紀錄分析，冬季期間蘇澳地區季節風向以西北西向為主，西北向次之；夏季季節風向則以東南東、南、與南南東為主。

除季節風外，颱風亦是影響港口營運的重要因素，而颱風侵襲挾帶的暴風、豪雨、與暴風湧浪，均會造成港灣設施嚴重的影響，甚至遭至破壞。依據中央氣象局 1897 ~ 1986 侵台颱風進行統計分析結果，平均每年約有 3 個颱風會侵襲台灣。而侵襲台灣的颱風中有 57.7% 會直接影響蘇澳港附近海域，亦即平均每年約有 2 個颱風侵襲蘇澳港附近海域。颱風侵台之路線的不同，對於港域影響範圍與程度均有差異，因此必須隨時注意其動向。

2-2-2 海象資料

由於海港是直接構築於海岸的結構，因此遭受海洋變動的影響也最為直接。台灣四面環海，位於颱風侵襲區域，因颱風所引發海洋的變動，如暴潮、颱風波浪等，會對於海岸地區結構物造成極大的衝擊。季節性波浪與近岸流動在長期的作用下，亦會使得海岸地形有明顯地變遷。波浪、潮汐、海洋流況等，為海岸工程領域中最重要的資料，須長期持續與完整的收集。

依據目前收集的海象資料，得知蘇澳港的潮汐變化屬於半日潮，潮位資料經分析後得到蘇澳地區之潮位如下：

最高高潮位	+1.90m
平均高潮位	+1.28m
平均潮位	+0.86m
平均低潮位	+0.44m
最低低潮位	-0.33m
平均潮差	0.84m
最大潮差	1.97m

在外海的波浪通過港口入侵港池後，波浪受到港域地形影響，會在港內產生不同的水位變化分佈情形。由於港域幾何特性，與港池中一些港灣及消波設施的配置下，港域有其一定的自然頻率。倘若入侵到港池的波浪頻率與港池自然頻率接近時，則會產生所謂的共振現象，引發港池振盪，如此將造成港池內不安定的情形，影響船隻的停泊與港域的有效運用。為了瞭解蘇澳港現階段港池受到波浪入射影響港內波高分佈之特性，以及探討港池不安定的原因，本子題計畫採用數值模擬方法，建立數值模式，計算蘇澳港港池振盪現象。目前模式的建立已完成，經由測試後亦得到滿意的計算結果，將可於後續計畫建立數值模式使用之格網後，進行實際的計算。

第三章 模式建立說明

3-1 模式建立

目前有關港池振盪之計算可分為兩種方法：一為視港池為等水深，控制方程式為 Laplace 方程式的求解方法 (Lee, 1971)；一為考慮港池為不等水深，控制方程式為緩波方程式 (mild-slope equation) 的求解方法 (蘇, 1993)、(蘇和陳, 1995)。在第二章曾提到蘇澳港港池的深度變化，各港區最淺的區域在 5m 左右，最深處可達 20m 以上。經考量後決定採用第二種求解方法，亦即利用緩波方程式作為模式建立之控制方程式。

3-1-1 基本方程式與邊界條件

本子題計畫在求解方法上將海域分為外海區 (I 區) 與港池區 (II 區) 兩個計算領域 (如圖 3-1-1 所示)。外海區假設為等水深區域，處理方式則引用解析解 (Chen and Mei, 1974)；港池區則考慮不等水深，採用之數值方法為有限元素法。在入射波浪為線性、單一週期規則波浪的假設下，各領域內之水位變化 $\eta(x, y, t)$ 可表示為

$$\eta(x, y, t) = u(x, y) e^{i\sigma t} \quad (3-1-1)$$

式中 $u(x, y)$ 為波函數， σ 為波浪角頻率。各計算領域的控制方程式與邊界條件為

I 區控制方程式與邊界條件

$$\text{G.E.} \quad \nabla^2 u_1 + k_0^2 u_1 = 0 \quad (3-1-2)$$

$$\text{B.C.} \quad \partial A : u_2 = u_1 = u^i + u^r + u^s \quad (3-1-3)$$

$$\frac{\partial u_1}{\partial n_1} = -\frac{\partial u_2}{\partial n_2} = \frac{\partial u_2}{\partial n_1} \quad (3-1-4)$$

$$\partial C : \frac{\partial u_1}{\partial n_1} = 0 \quad (3-1-5)$$

$$\partial D : \lim_{k_0 r \rightarrow \infty} \sqrt{r} \left(\frac{\partial u^s}{\partial r} + i k_0 u^s \right) = 0 \quad (3-1-6)$$

II 區控制方程式與邊界條件

$$\text{G.E.} \quad \nabla \cdot (C_2 C_{g2} \nabla u_2) + (C_{g2}/C_2) \sigma^2 u_2 = 0 \quad (3-1-7)$$

$$\text{B.C.} \quad \partial A : u_2 = u_1 = u^i + u^r + u^s \quad (3-1-8)$$

$$\frac{\partial u_2}{\partial n_2} = -\frac{\partial u_1}{\partial n_1} = \frac{\partial u_1}{\partial n_2} \quad (3-1-9)$$

$$\partial B : \frac{\partial u_2}{\partial n_2} = 0 \quad (3-1-10)$$

其中， k_0 為外海入射波浪之波數 (wave number)， C 與 $C_g = \kappa C$ 分別為波速與群波速度， $\kappa = 0.5[1 + (2k_0 h / \sinh 2k_0 h)]$ ， n 為各領域邊界向外法線方向，下標 1, 2 分別代表第 I 區與第 II 區計算領域。I 區波函數 u_1 可分為 u^i 、 u^r 、 u^s 三個成份波，分別代表港外入射波、反射波以及港內由港口向外散射之散射波。

3-1-2 有限元素法

對於上述的複雜邊界值問題，本文使用混合有限元素法 (hybrid finite element method) 求解。外海區域 (I 區) 應用特徵函數 (eigenfunctions) 表示法，波函數 u_1 之各成份波 u^i 、 u^r 、 u^s 可分別表示如下：

$$\begin{aligned}
u^i(r, \theta) &= a_0 e^{-ik_0 r \cos(\theta - \theta_0)} \\
&= a_0 \sum_{n=0}^{\infty} \varepsilon_n (-i)^n J_n(k_0 r) \cos[n(\theta - \theta_0)]
\end{aligned} \tag{3-1-11}$$

$$\begin{aligned}
u^r(r, \theta) &= a_0 e^{-ik_0 r \cos(\theta + \theta_0)} \\
&= a_0 \sum_{n=0}^{\infty} \varepsilon_n (-i)^n J_n(k_0 r) \cos[n(\theta + \theta_0)]
\end{aligned} \tag{3-1-12}$$

$$u^s(r, \theta) = \sum_{n=0}^{\infty} \mu_n H_n^{(1)}(k_0 r) \cos(n\theta) \approx \sum_{n=0}^{M-1} \mu_n H_n^{(1)}(k_0 r) \cos(n\theta) \tag{3-1-13}$$

式中， a_0 為入射波振幅， $J_n(k_0 r)$ 為第一類 n 階 Bessel 函數， $H_n^{(1)}(k_0 r)$ 則為第一類 n 階 Hankel 函數， θ_0 為外海入射波浪角度， μ_n 為待求之未知係數， ε_n 滿足

$$\varepsilon_n = \begin{cases} 1 & n=0 \\ 2 & n=1, 2, \dots \end{cases} \tag{3-1-14}$$

有限港池區域（II區）以有限元素法進行模式的建立。根據II區的控制方程式與邊界條件(3-1-7)~(3-1-10)式，以加權殘差概念配合部分積分法則，可以得到下列加權殘差式：

$$\begin{aligned}
&\iint_{\Omega} \left[- (C_2 C_{g^2}) \nabla u_2 \nabla \phi_i + \left(\frac{C_{g^2}}{C_2} \right) \sigma^2 u_2 \phi_i \right] dA \\
&+ \int_{\partial A} (C_2 C_{g^2}) \frac{\partial u^s}{\partial n_2} \phi_i dS + \int_{\partial A} (C_2 C_{g^2}) \frac{\partial (u^i + u^r)}{\partial n_2} \phi_i dS = 0
\end{aligned} \tag{3-1-15}$$

利用有限元素法原理，將II區之值域以 N 個節點 (node) 區分為 L 個元素 (element)。本文採用三角形或四邊形元素，每個元素之邊長以不超過1/10波長為原則，並選用一組線性形狀函數 ϕ_i (shape function) 表示元素之波函數 u_2^e 、波速 C_2^e 與群波速度 $C_{g^2}^e$ 如下

$$u_2^e = \sum_{j=1} \phi_j u_{2j}^e \quad (3-1-16)$$

$$C_2^e = \sum_{j=1} \phi_j C_{2j}^e \quad (3-1-17)$$

$$\kappa_2^e = \left(\frac{C_{g2}}{C_2} \right)^e = \sum_{j=1} \phi_j \kappa_{2j}^e \quad (3-1-18)$$

$$C_{g2}^e = \sum_{j=1} \phi_j \kappa_{2j}^e C_{2j}^e \quad (3-1-19)$$

將有限元素概念引入加權殘差式中，並代入 u^i 、 u^r 、 u^s 的表示式，可以得到

$$\sum_{j=1} K_{ij}^e u_{2j}^e + \sum_{j=0}^{M-1} (K_2)_{ij}^e \mu_j = F_i^e \quad (3-1-20)$$

式中

$$\begin{aligned} K_{ij}^e &= \sum_{p=1} \sum_{q=1} -(\kappa_{2p}^e C_{2p}^e C_{2q}^e) \left\{ \iint_{\Omega^e} \phi_p \phi_q \nabla \phi_i \cdot \nabla \phi_j dA \right\} \\ &+ \sum_{p=1} \sigma^2 \kappa_{2p}^e \left\{ \iint_{\Omega^e} \phi_p \phi_i \phi_j dA \right\} \end{aligned} \quad (3-1-21)$$

$$(K_2)_{ij}^e = k_0 (C_2 C_{g2}) \left\{ \int_{\partial A^e} H_j^{(1)'}(k_0 r) \cos(j\theta) \phi_i dS \right\} \quad (3-1-22)$$

$$F_i^e = - \int_{\partial A^e} (C_2 C_{g2}) \frac{\partial (u^i + u^r)}{\partial n_2} \phi_i dS \quad (3-1-23)$$

(3-1-19)式為各元素之離散化加權殘差式。將II區中各元素局部節點對應到大域領域的節點編號，可以得到大域領域之離散化加權殘差式：

$$\sum_{j=1}^N K_{ij} u_{2j} + \sum_{j=0}^{M-1} (K_2)_{ij} \mu_j = F_i \quad i=1 \sim N \quad (3-1-24)$$

由於問題求解將整個領域分為兩個計算領域，利用混合有限元素法求解時，須引入交界面之另一邊界條件，此交界面條件為

$$\int_{\partial A} (C_2 C_{g2}) \left[u_2 - (u^i + u^r) - u^s \right] \frac{\partial u^s}{\partial n_2} dS = 0 \quad (3-1-25)$$

對於此交界面條件，同樣採取如加權殘差式的處理方法，將有限元素概念引入交界面條件中，並代入 u^i 、 u^r 、 u^s 的表示式，可以得到交界面條件之局部離散式

$$\sum_{j=1}^N S_{ij}^e u_{2j} + \sum_{j=0}^{M-1} (S_2)_{ij}^e \mu_j = G_i^e \quad i=0 \sim M-1 \quad (3-1-26)$$

式中

$$S_{ij}^e = k_0 (C_2 C_{g2}) \left\{ \int_{\partial A^e} H_i^{(1)'}(k_0 r) \cos(i\theta) \phi_j dS \right\} \quad (3-1-27)$$

$$(S_2)_{ij}^e = -k_0 (C_2 C_{g2}) \left\{ \int_{\partial A^e} H_i^{(1)'}(k_0 r) H_j^{(1)}(k_0 r) \cos(i\theta) \cos(j\theta) dS \right\} \quad (3-1-28)$$

$$G_i^e = k_0 (C_2 C_{g2}) \int_{\partial A^e} (u^i + u^r) H_i^{(1)'}(k_0 r) \cos(i\theta) dS \quad (3-1-29)$$

將局部離散式對應至大域領域，可以組合大域領域之交界面條件離散式如下：

$$\sum_{j=1}^N S_{ij} u_{2j} + \sum_{j=0}^{M-1} (S_2)_{ij} \mu_j = G_i \quad i=0 \sim M-1 \quad (3-1-30)$$

(3-1-24)式與(3-1-30)式中，共可組合成 $(M+N)$ 條方程式，求解 I 區散射波 u^s 之 M 項未知係數 μ_n ，以及 II 區 N 個節點之波函數 u_2 。寫成矩陣式則如下列所示：

$$\begin{bmatrix} K_{ij} & (K_2)_{ij} \\ S_{ij} & (S_2)_{ij} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_{2j} \\ \mu_j \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_i \\ G_i \end{Bmatrix} \quad (3-1-31)$$

3-2 模式測試

本計畫採用混合解析解與有限元素法，建立蘇澳港港池振盪計算模式，利用分區的觀點並且對於外海區域以解析解描述其水位變化，配合使用交界面的邊界條件，可以直接求解整個問題而僅僅計算單一有限區域，計算效率可提升許多。

數值計算模式建立以後，必須經由測試驗證模式正確無誤後，方可進行實際問題的計算。為驗證本計畫建立之模式的正確性，選取一矩形等水深港池進行測試計算，並與過去學者採用不同計算模式之計算結果或試驗結果進行比較。所計算矩形港池如圖 3-2-1 所示，港池縱深 $l=12.25$ 英尺，寬 $b=2.48$ 英尺，深度 $h=10.128$ 英尺；入射波浪則以垂直海岸線方向向港口傳遞。在港口開端以半圓形作為外圍開放邊界，港池區域三角形元素網格亦示意於圖中。

圖 3-2-2 為在矩形港池底端中點處，無因次波數 $k_0 l$ 與擴大率 R 之關係圖。港池擴大率 $R(x,y)$ 定義為港內任意點 (x,y) 之振幅與港口封閉時港口開端中點處入射波與反射波和之振幅的比值。圖中亦附上 Ippen and Goda (1963)、Lee (1969) 之試驗資料，以及 Tsay and Liu (1986) 數值計算結果。圖 3-2-2 顯示本計畫建立之數值模式與 Tsay and Liu (1986) 的計算結果非常吻合，與試驗資料的比較亦接近，驗證此數值模式在等水深港池計算的合理性。由於模式已考量了港池不等水深的影響，因此預期本模式計算蘇澳港港池振盪亦能得到合理的結果。

第四章 模擬計算、結果與討論

對於蘇澳港港池振盪問題 (harbor resonance) 之研究，本計畫利用前節驗證正確的有限元素法數值模式加以計算。所考慮的將先探討現有港池配置港池穩定之情形，然後再評估可能改善港池穩定性的配置方案。以下分別說明模擬計算的條件、模擬計算結果，和針對所計算結果的討論。

4-1 現況模擬計算條件

港池振盪計算的目的在了解某一特定港池，在受到入射波浪入侵後港內波浪的分佈情形。因此，有關港池振盪之計算所要考慮的條件，基本上包括港池水深條件和港池配置情形；入射波的條件包括波高、週期和方向。

蘇澳港港池水深條件如圖 2-1-3。現有港池配置如圖 2-1-2 所示。數值模式計算蘇澳港港池振盪所選取範圍如圖 4-1-A 所示。以下將會考慮到的可能改善港池穩定性的配置將屆時再說明。另外由於港池岸壁可能有或多或少的消波效應，為能得到較接近實際的模擬，因此在數值計算中港池岸壁設定有消浪係數。如圖 4-1-1 所示，圖中標示為 1 者為消波係數 5%，標示為 2 者為消波係數 20%，各消波係數之選定為依據實際狀況作一估計而定。

所考慮入射波浪的條件包括波高、週期和入射波浪方向。對於入射波波高的考慮，由於所使用數值計算的模式係建立在線性理論上，因此所計算之港內波浪之波高將以入射波波高來無因次化表示。在實用上若需知道港內實際的波高則再乘上入射波波高即可。由此入射波波高皆以單位量表示。所考慮入射波的方向為方向一 (SE)、方向二 (SSE) 和方向三 (NE)。所考慮的波浪週期為 10 秒~160 秒。

所使用有限元素數值模式，採用四邊形九點元素，對於蘇澳港港池之

模擬使用 6480 個元素，22765 個節點。由於需計算最短週期 10 秒之波浪因此元素之最短邊長為能夠達到八分之一波長之要求。所使用有限元素格網如圖 4-1-2 所示。

4-2 現況模擬結果

現有蘇澳港港池配置對入射波浪所產生港內波浪之分佈情形，以下就波浪週期分別為 20 秒、26 秒、65 秒、160 秒，入射波方向為 SE、SSE、NE 的結果畫出來。為了更明瞭港內波浪分佈的型態，港內波浪相對於入射波的位相也同時考慮表出；另外港內波浪的振幅係用入射波無因次化表示。圖 4-2-1a、b、c 為入射波浪週期 20 秒分別在三個方向產生港池內波浪分佈的結果。由圖可看出由於波浪的入侵，港內波浪表現出相當明顯的部份重覆波的型態。同時由此三圖的比較可看出由於入射波在港口入射的方向不同，隨即顯示出的波浪型態也不同。圖中所顯示的為相對於入射波位相港內波浪的振幅。利用這樣的表示方法，可將波浪在港內振盪的型態很明顯的表出。然而固然在港口附近港池由於入射波方向所產生的重覆波型態明顯，但是一進入港池由於任意型態的港池幾何型狀影響，港內重覆波型態則不再是容易預測。而這正是數值模式模擬計算功能強大之處。由圖三個方向之波浪入射可看出，SE 入射方向所引起港池振盪較嚴重，其次 NE 入射方向，再其次為 SSE 入射方向。

圖 4-2-2a、b、c 為入射波浪週期 26 秒分別在三個方向產生港池內波浪分佈的結果。如同前面之討論 SE 方向的入射所引起港池之振盪較明顯，其次為 NE 方向，再其次為 SSE 方向。在此值得注意的，在防波堤港內側南面角落處波浪較大。此亦為計算港池振盪分析的目的之一，了解入射波浪在港內所引起較異常的波浪。圖 4-2-3a、b、c 為入射波浪週期 65 秒分別在三個方向產生港池內波浪分佈的結果。在這樣的週期下不同入射方向對港內所產生波浪分佈的型態漸漸相近。圖 4-2-4a、b、c 為入射波浪週期 160 秒分別在三個方向產生港池內波浪分佈的結果。較長於前

一個 65 秒週期，不同入射方向對港內所產生波浪分佈的型態漸漸相同。

由波浪在港內的分佈結果可知，由於港池的幾何不規則性，由同一入射波浪所引起港內各處的波浪可能不盡相同。而由整個港池的波浪分佈是可以知道整個波浪場，但往往在實際應用上，需要知道某一特定位置對各個入射波浪頻率的變化情形。以下就針對第 4、5、8、9、12、13 碼頭處對入射波浪的反應曲線加以說明。圖 4-2-5、6、7、8、9、10 分別為 4、5、8、9、12、13 號碼頭對三個入射波浪方向 SE、SSE、NE 的波浪反應曲線。由於幾何位置的關係，第 4 和 5 號碼頭的波浪反應曲線很相似，第 8 和 9 號碼頭的波浪反應曲線很相似，而第 12 和 13 號碼頭的波浪反應曲線很相同。由結果比較可看出對 100 秒以上的波浪在幾何位置相近處的波浪反應頗為相似。

4-3 改善方案模擬

對於蘇澳港港池穩靜改善之考慮，曾進行過”蘇澳港水工模型遮蔽試驗”、”蘇澳港共振計畫”、”蘇澳港消波問題研究”等，基本上均是對蘇澳港港池配置考慮可能之消波措施，然而蘇澳港港內水域穩靜問題似乎仍舊是需要探討的問題。本研究考慮因素，係針對颱風波浪及湧浪等較長週期之波浪，因此不從消浪的方向考量。評量過去研究之結果和目前蘇澳港之配置成效來看，似乎蘇澳港再次改善之地方難尋。基於此乃再由蘇澳港之配置圖來探討可能改善的地方。

由航道碎波堤的方向來看，進入港內的波浪均反射進入港內商港區，因此減少商港區波浪的方法即是設法減少進入此區的波浪，由此即是改變航道碎波堤的堤向。而改變此堤配置將影響第六和第七號碼頭的格局，在本研究將以最少改變的方式建議。另一方面的考慮為在北內堤的走向上，此堤係蘇澳港港內穩靜的關鍵，若此堤能往港口方向偏移使正向港口的方向，則入侵波浪能即時反射出港，似乎港內會有較安穩的水域。然而若考量現有港池航道路線，加上軍港既有設施不易更改，因此有關北內堤的配

置修正不予考慮。

經由以上的考慮所建議的配置改善方案如圖 4-3-1 所示，航道碎波堤向小部份轉折，且碼頭區堤尖切平平行於航道。如此考慮的想法是希望入侵港池波浪到達航道碎波堤時，能即由此堤反射回去而不會部份轉入軍港和商港區。而碼頭尖角切平則在減少影響航道的空間。

針對所計算改善方案所使用的有限元素格網如圖 4-3-2 所示。所考慮入射波的方向為方向一 (SE)、方向二 (SSE) 和方向三 (NE)。所考慮的波浪週期為 10 秒~160 秒。數值計算結果對於第 4、5、8、9、12、13 碼頭處對入射波浪的反應曲線繪出如圖。圖 4-3-3、4、5、6、7、8 分別為 4、5、8、9、12、13 號碼頭對三個入射波浪方向 SE、SSE、NE 的波浪反應曲線。所計算結果和現有港池配置計算結果圖 4-2-5 至 4-2-10 比較可知所建議改善僅對於較短波浪週期 15 秒左右有些些的改善，對於較長週期波浪則仍然無明顯改進。

4-4 建議方案說明

對於蘇澳港港池穩靜經由上節之考慮仍然無法非常有效的改善，因此探討的方向轉往蘇澳港長期歸劃改善方案。蘇澳港過去曾經由中華顧問工程司研究規劃出一建議的配置方案如圖 4-4-1 所示，在現有港口外面在加建防波堤，北外防波堤長 2050 公尺、南外防波堤 850 公尺。以下引用當時規劃成果加以說明遠期規劃的效果。由於蘇澳港口外面再加上兩支防波堤，因此對於入侵波浪的防制效果相當有用。如圖 4-4-2 所示入射波浪週期 15 秒到 60 秒之間的入射波浪、入射方向在 E、ESE、SE，在商港一內之波浪反應結果均在 1.0 之下。而在商港二內之波浪反應曲線如圖 4-4-3 所示。煤輪碼頭區內的波浪反應曲線如圖 4-4-4 所示，而北方澳軍港區的結果則繪出如圖 4-4-5。對於圖 4-4-1 的遠期規劃在實際颱風波浪侵襲下港池內的穩靜情形則如圖 4-4-6 和圖 4-4-7 所示。圖 4-4-6 為 SE 方向颱風侵襲下在現況和遠期規劃案在 11 和 12 號碼頭區的波浪譜比較。而圖

4-4-7 為 SE 方向颱風過後在現況和遠期規劃案在 11 和 12 號碼頭區的波浪譜比較。由圖之比較可明顯看出，遠期規劃案對於颱風侵襲之防禦應有很好之效果。因此就長期蘇澳港港池之穩靜考量，在以後之改善方案應朝遠期規劃案來進行。

第五章 結論與建議

本研究主要在探討蘇澳港港池穩定問題，乃使用有限元素法數值模式計算港池振盪之現象，藉以了解蘇澳港在現況條件下之模擬情形，同時，也計劃討論可能的改善方案，希望能對今後蘇澳港港池穩定之改善在規劃方面有所建議。依照所提計劃案經研究結果得以下數點結論與建議。

1. 對蘇澳港現況模擬結果顯示，波浪在東南方向入侵會引起較其他方向嚴重的港池不穩定。較長波浪週期在港內波浪之分佈已漸和入侵方向無關，因此可說蘇澳港現況港池配置對較長波浪的防禦效果很小。
2. 對於蘇澳港港池穩定改善方案之考慮，本研究已收集歷年來所研究之改善方案可行性，然後再加以評估其效果和可行性。而由歷次改善結果顯示，較可行的改善方案在改變現有港池配置。藉此本研究乃在僅可能不影響現有航道的情形下建議一改善方案，然而經研究探討結果顯示，本建議改善方案對 15 秒以下入侵波浪會有些改善，但對於較長週期的波浪則改進相當有限。
3. 對於蘇澳港今後改善港池穩定性規劃方向之建議，本研究參考蘇澳港過去已作之規劃案配合目前本研究所作之結果比較，認為可能較有效的改善方案為遠程規劃案。即在現有防波堤外再加設外防波堤，以達到較明顯的防波效果。然而以現階段電腦計算的能力已遠超出當初規劃的預測，因此為得更正確的建議再進一步作規劃計算。另外，蘇澳港現階段港內實測資料相欠缺有礙數值計算模式之驗證，因此，建議未來蘇澳港應一面做到現場資料的監測，一面作到數值模式的校核，以能更正確的作港池穩定的計算，同時更正確的提供給遠程規劃設計的參考。

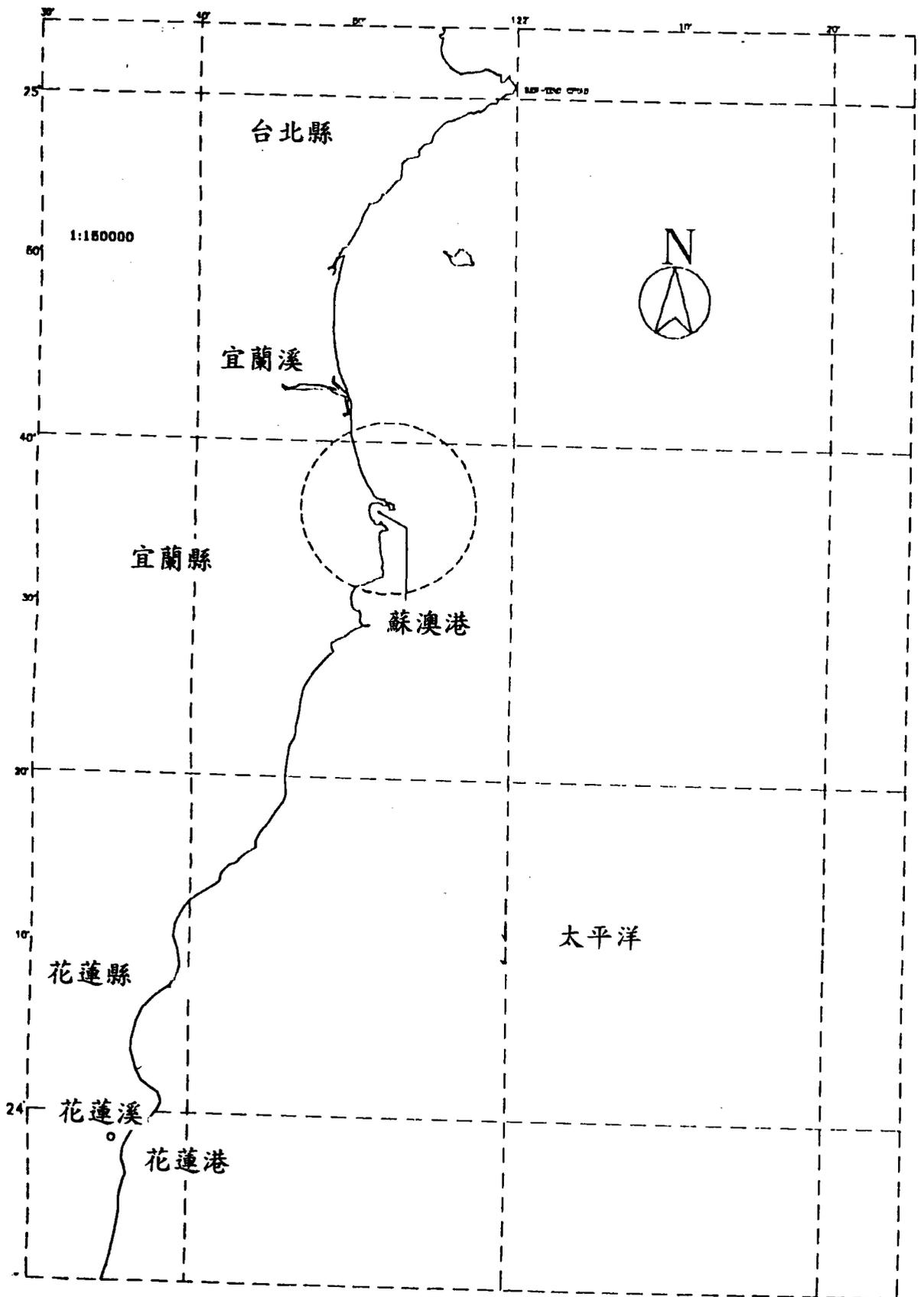


圖2-1-1 蘇澳港地理位置圖

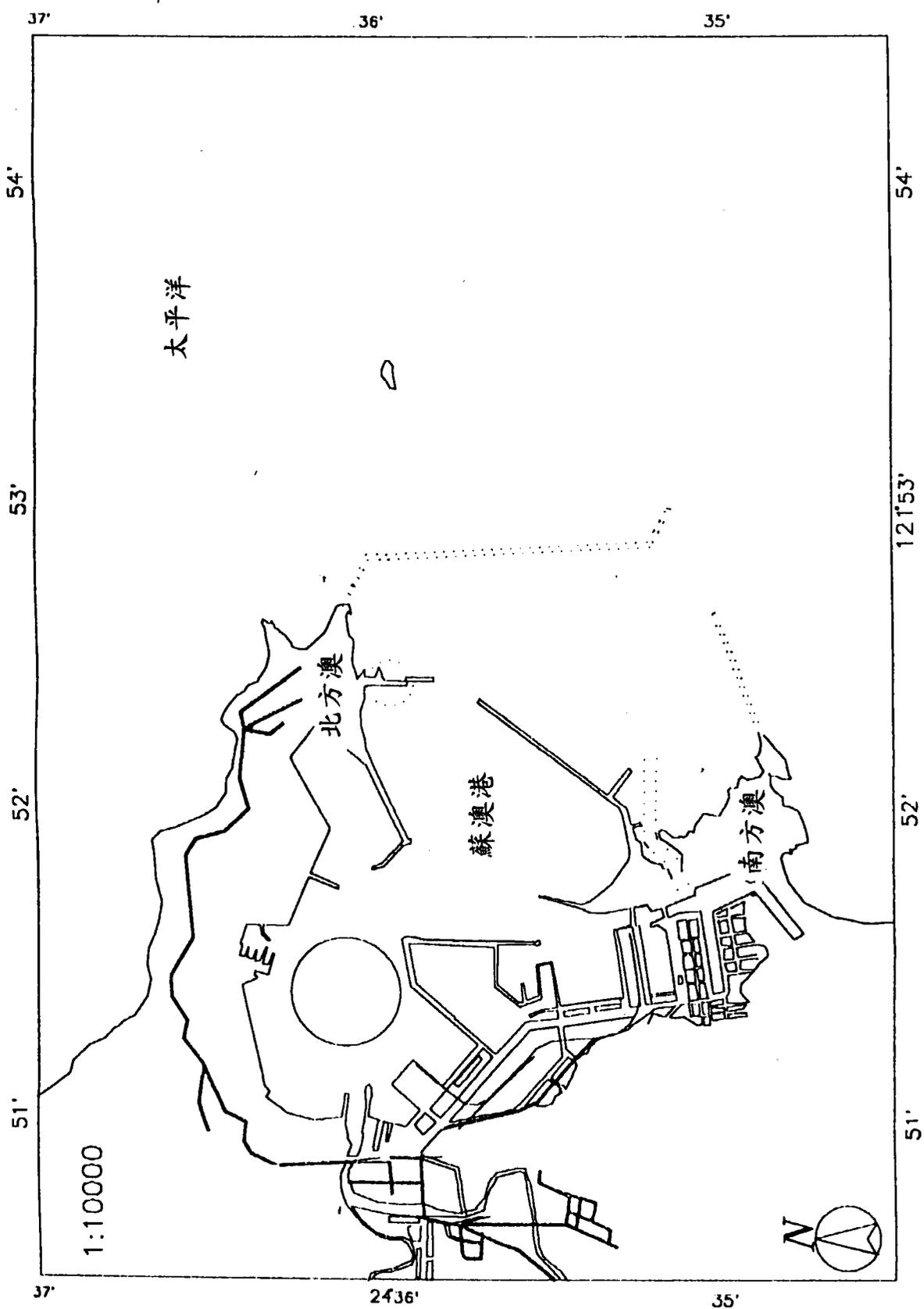


圖2-1-2 蘇澳港平面配置圖

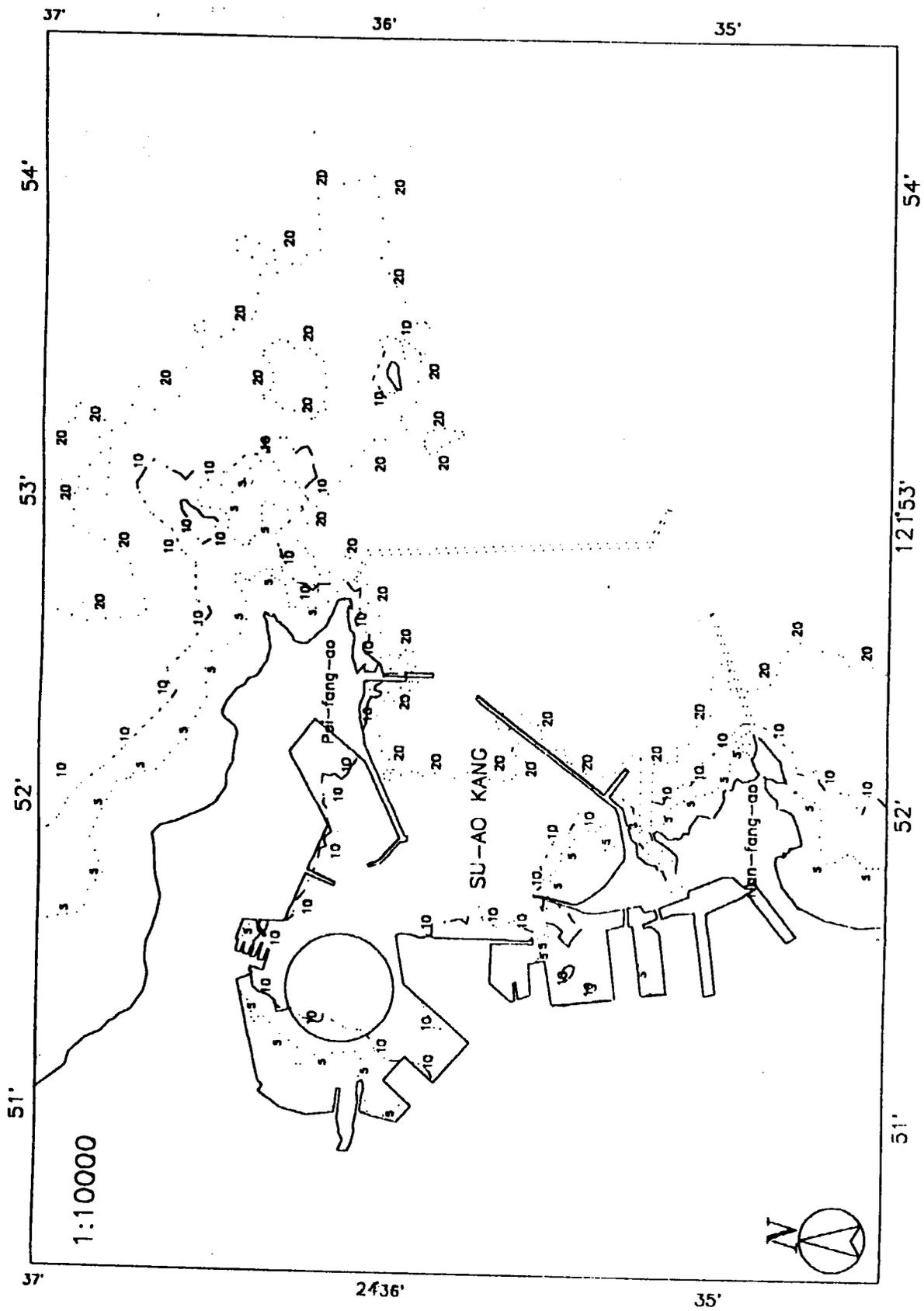


圖2-1-3 蘇澳港水深示意圖

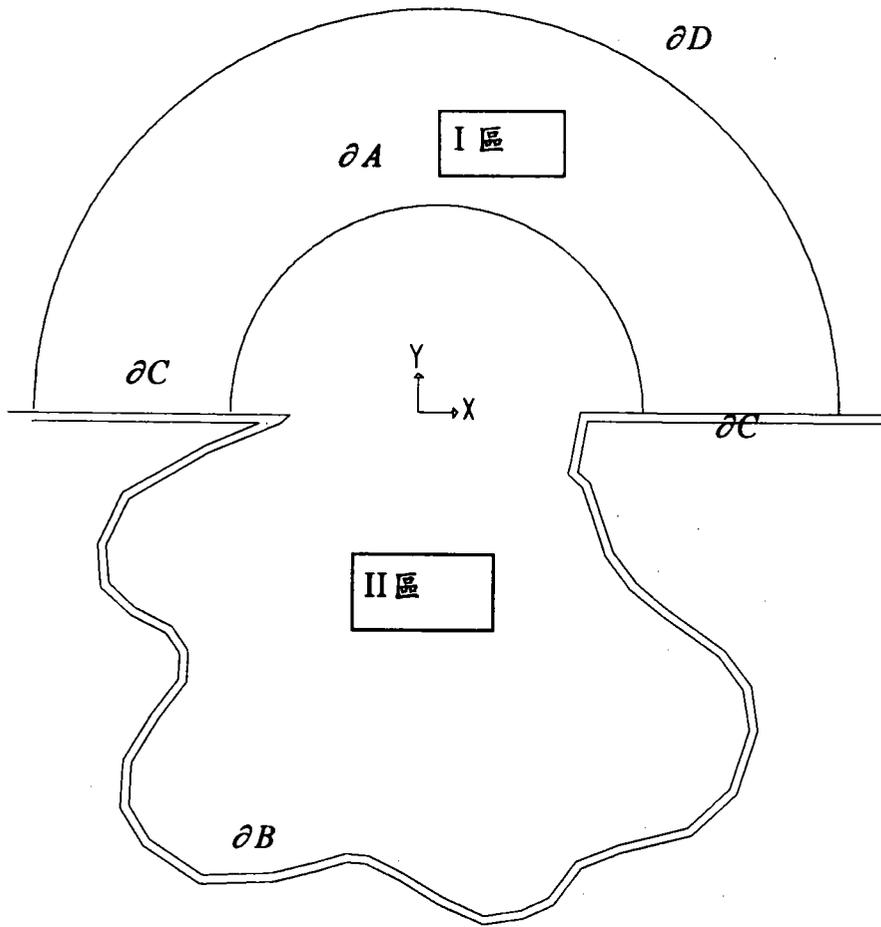


圖3-1-1 混合有限元素法區域分割示意圖

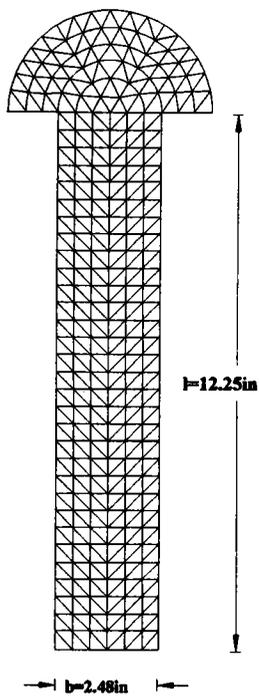


圖3-2-1 矩形港池三角形元素分割示意圖

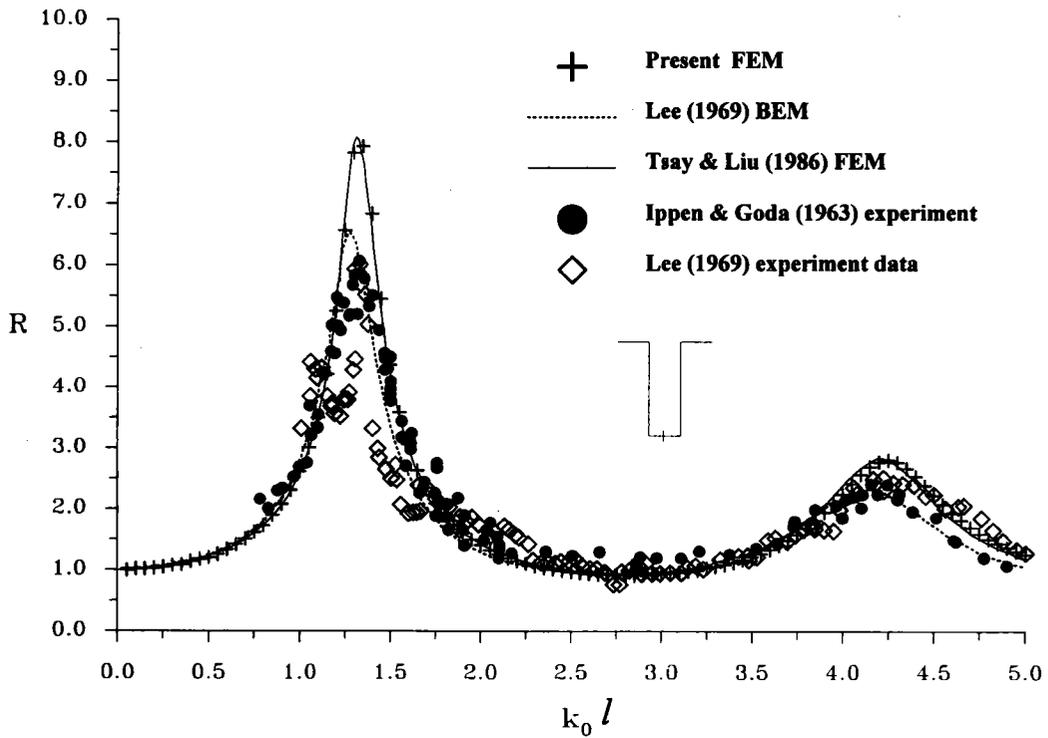


圖3-2-2 矩形港池底端中點處擴大率 R 與無因次波數 $k_0 l$ 相關曲線圖



圖4-1-A 模式計算選取範圍示意圖

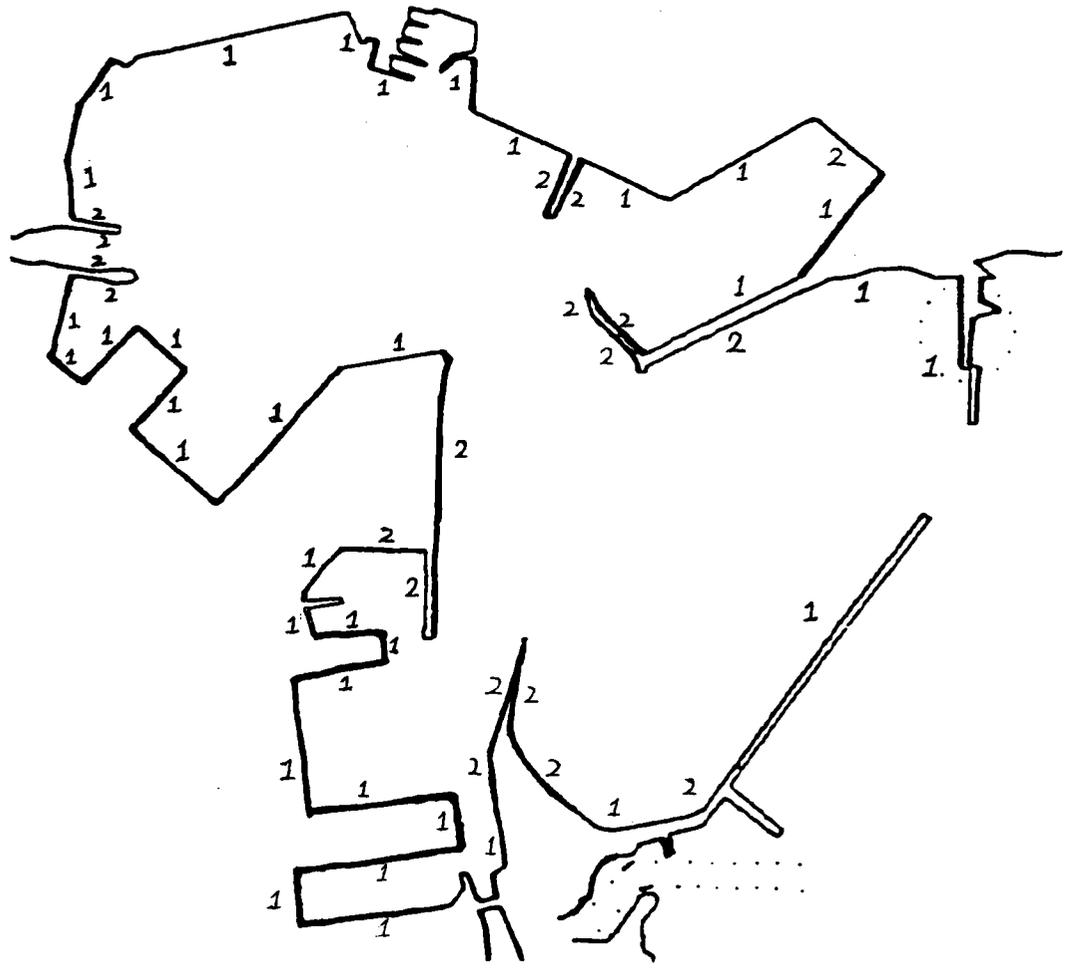


圖 4-1-1 蘇澳港港池岸壁數值計算消波係數

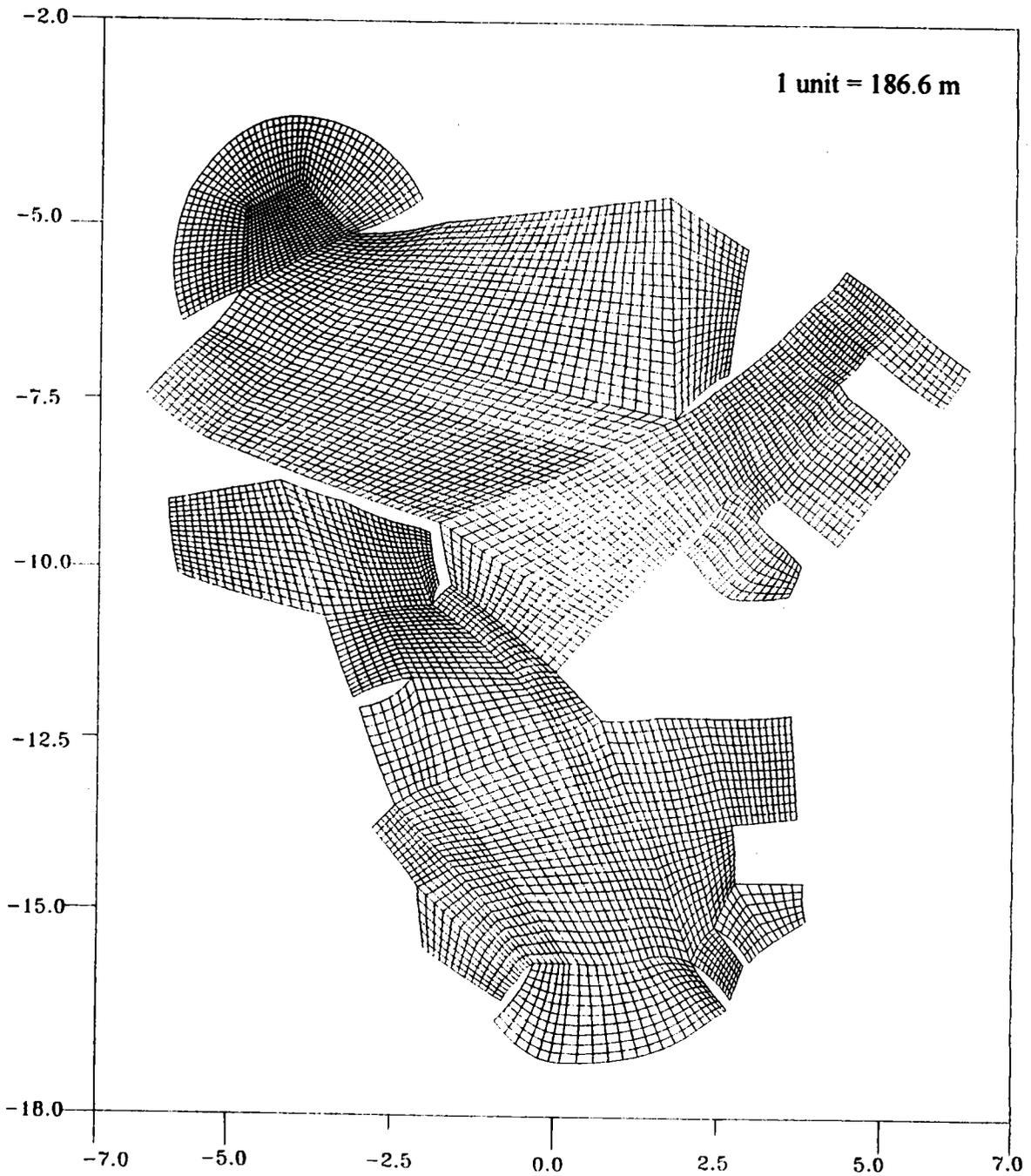


圖 4-1-2 蘇澳港現況有限元素網格

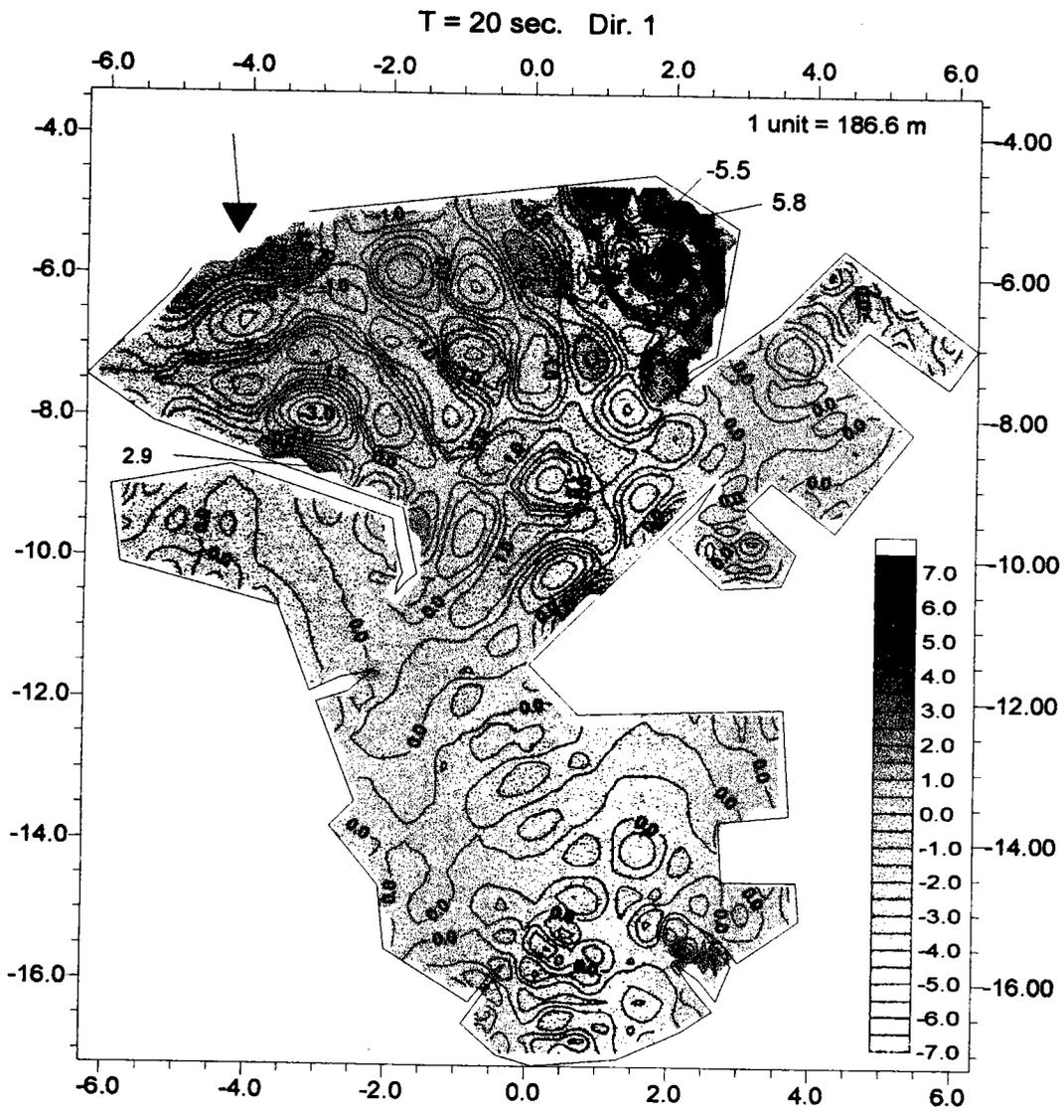


圖 4-2-1a 蘇澳港現沉港池波浪分佈(T=20sec, SE)

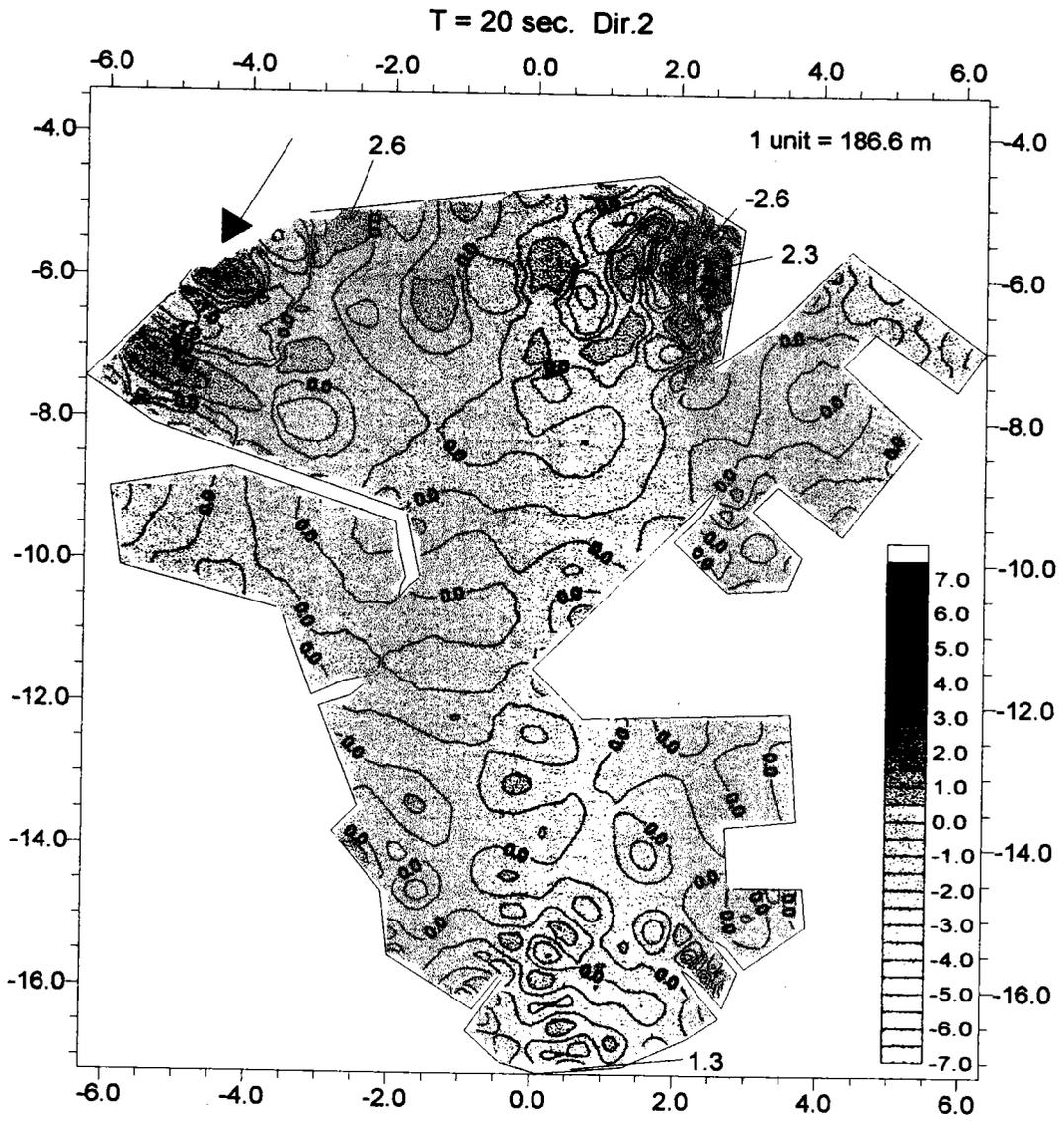


圖 4-2-1b 蘇澳港現況港池波浪分佈(T=20sec, SSE)

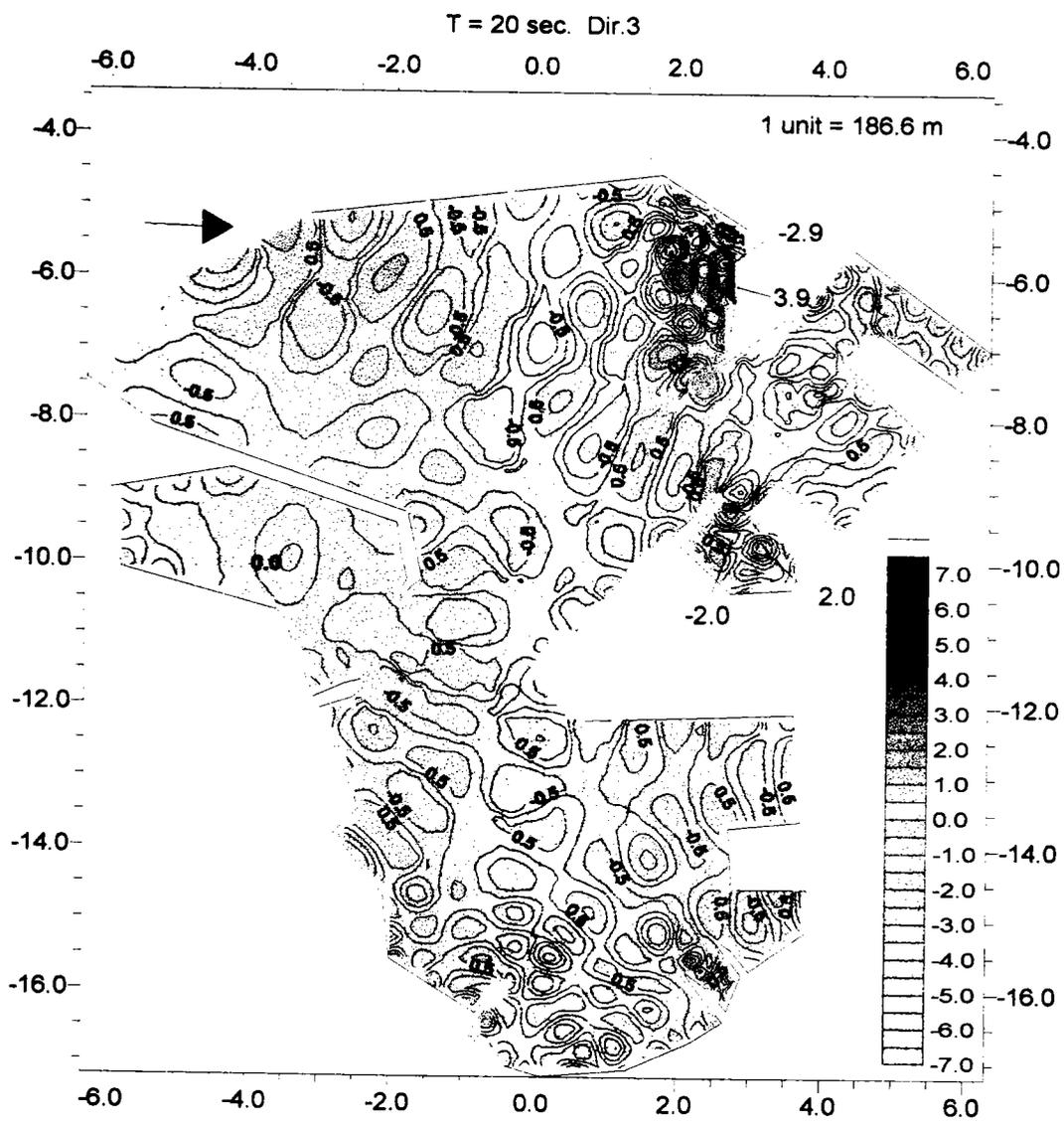


圖 4-2-1c 蘇澳港現況港池波浪分佈(T=20sec, NE)

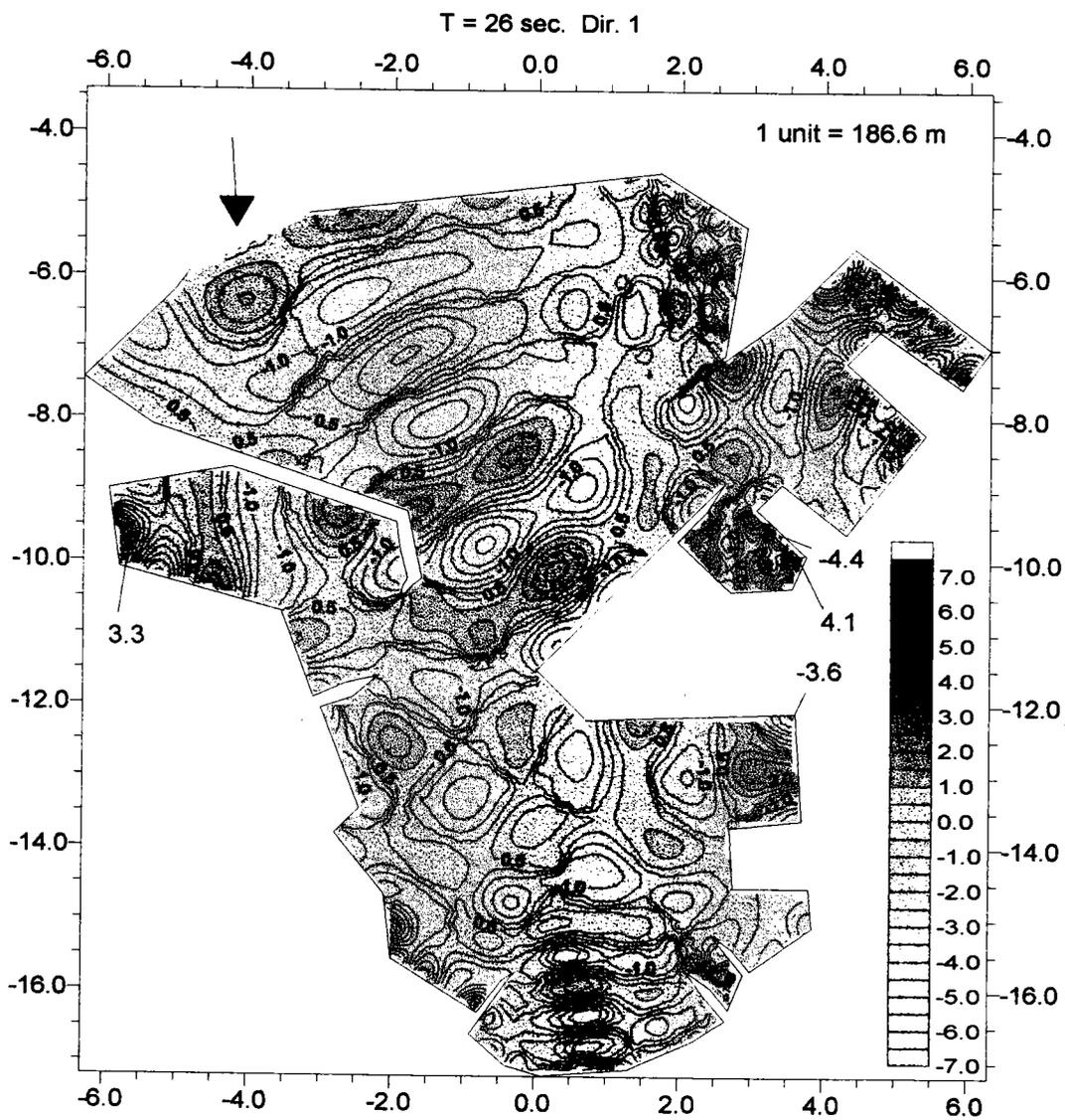


圖 4-2-2a 蘇澳港現況港池波浪分佈(T=26sec, SE)

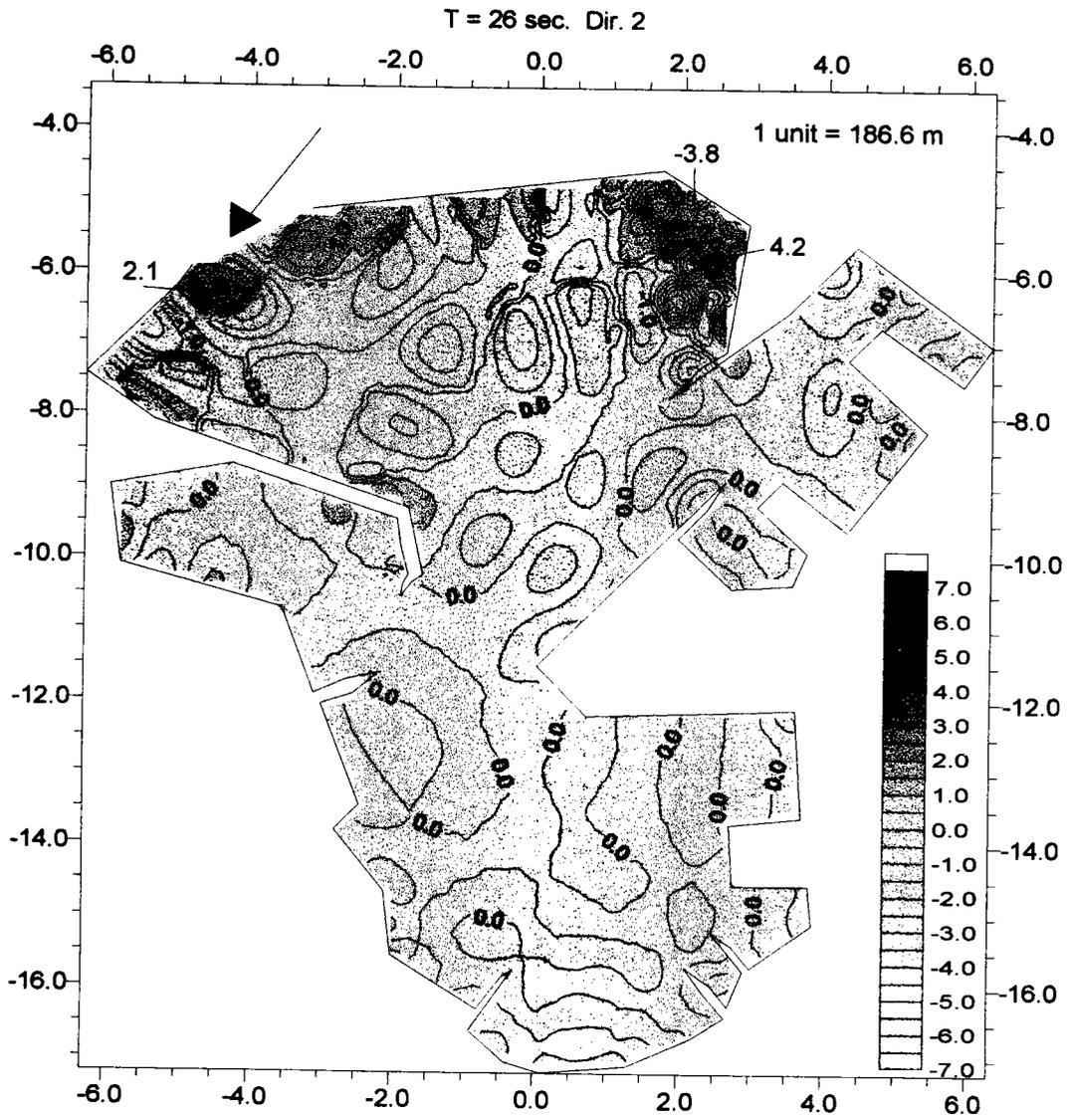


圖 4-2-2b 蘇澳港現沉港池波浪分佈(T=26sec, SSE)

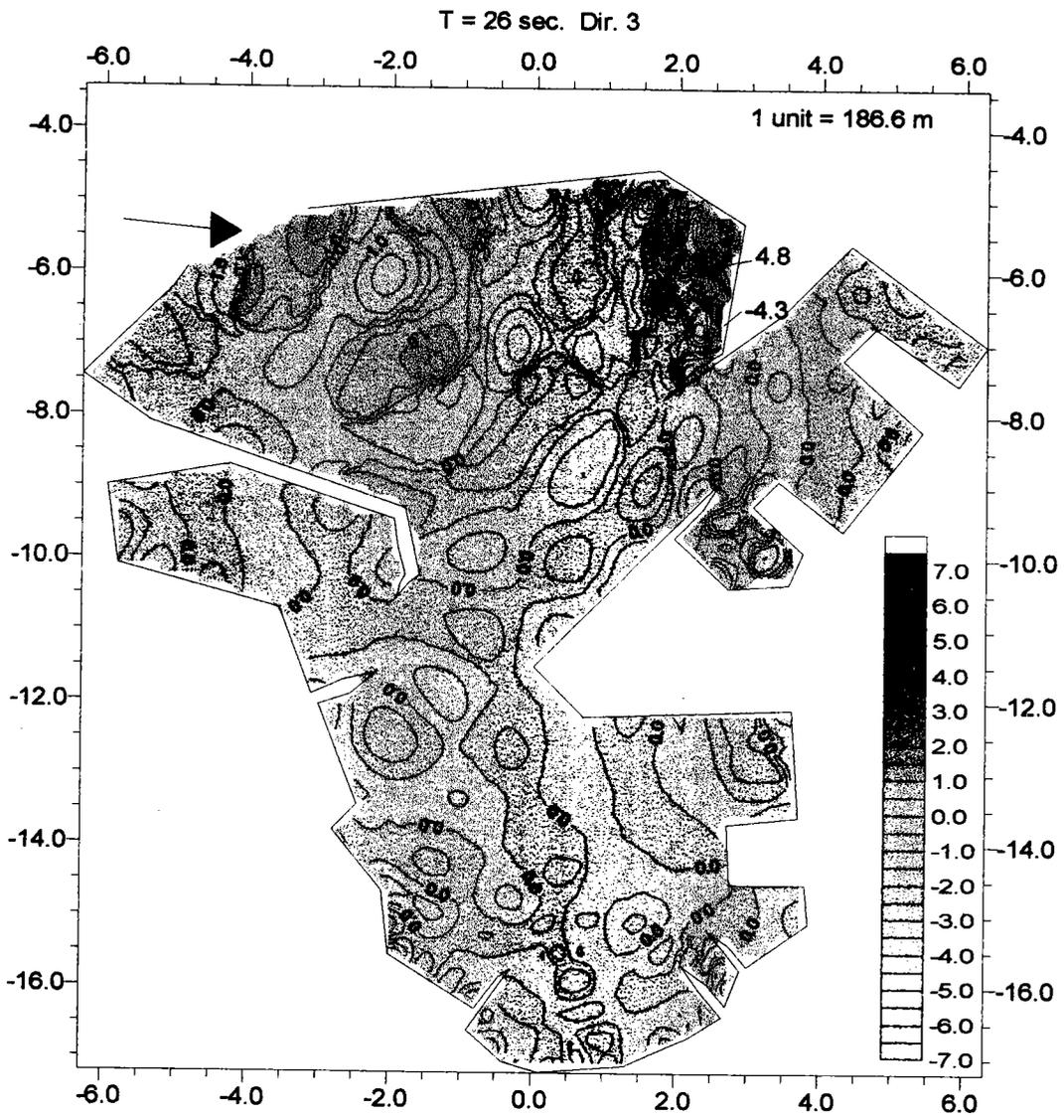


圖 4-2-2c 蘇澳港現沉港池波浪分佈(T=26sec, NE)

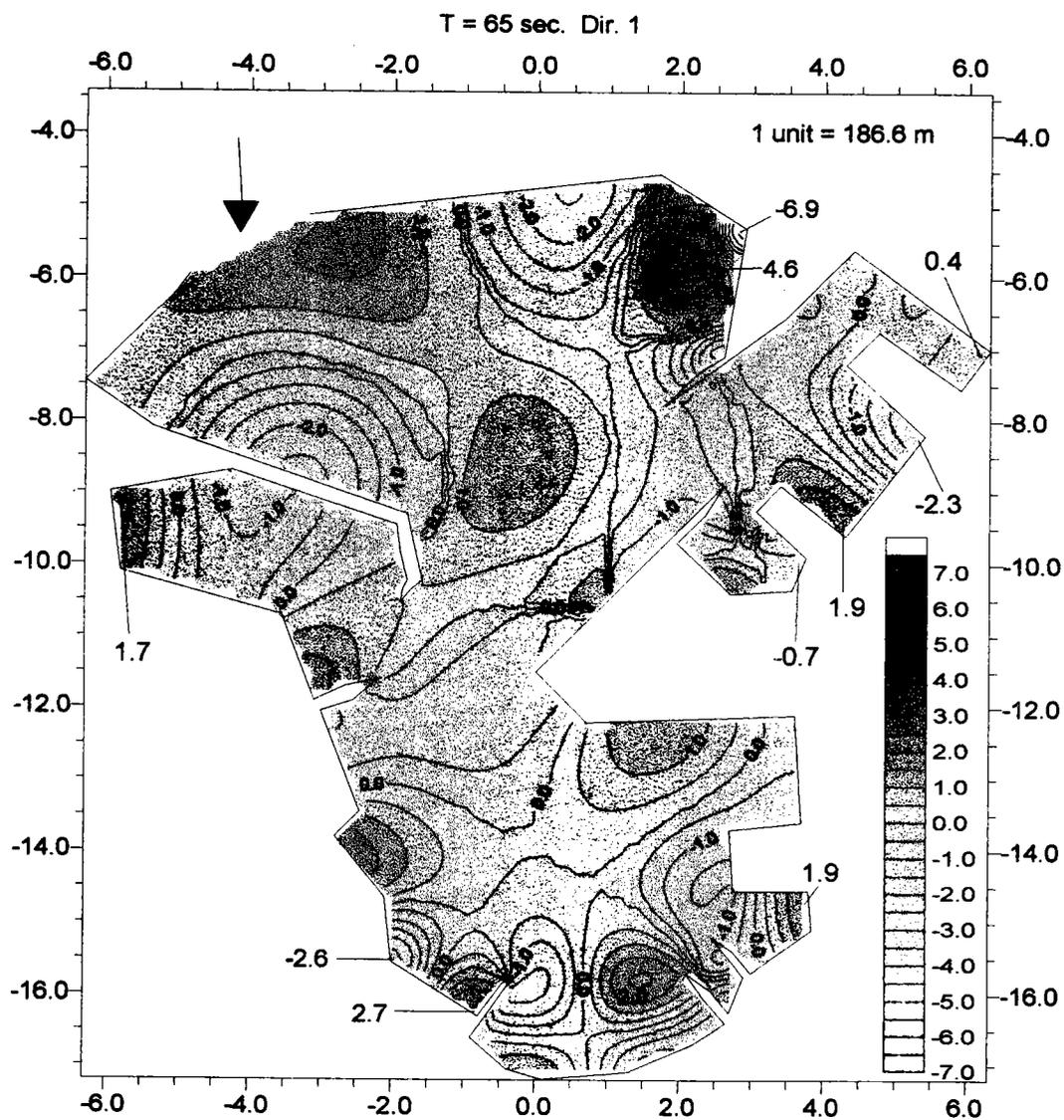


圖 4-2-3a 蘇澳港現況港池波浪分佈(T=65sec, SE)

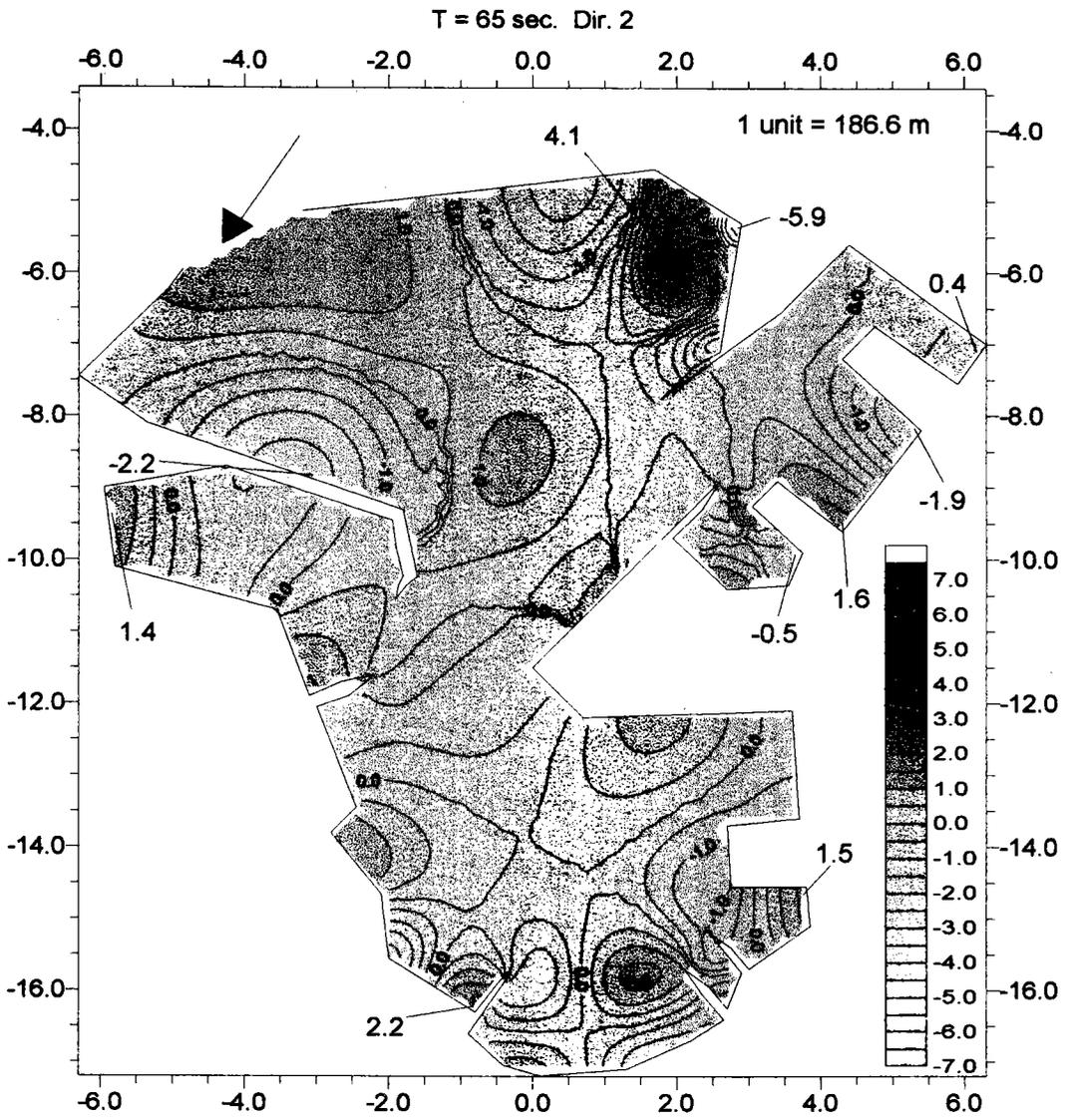


圖 4-2-3b 蘇澳港現沉港池波浪分佈(T=65sec, SSE)

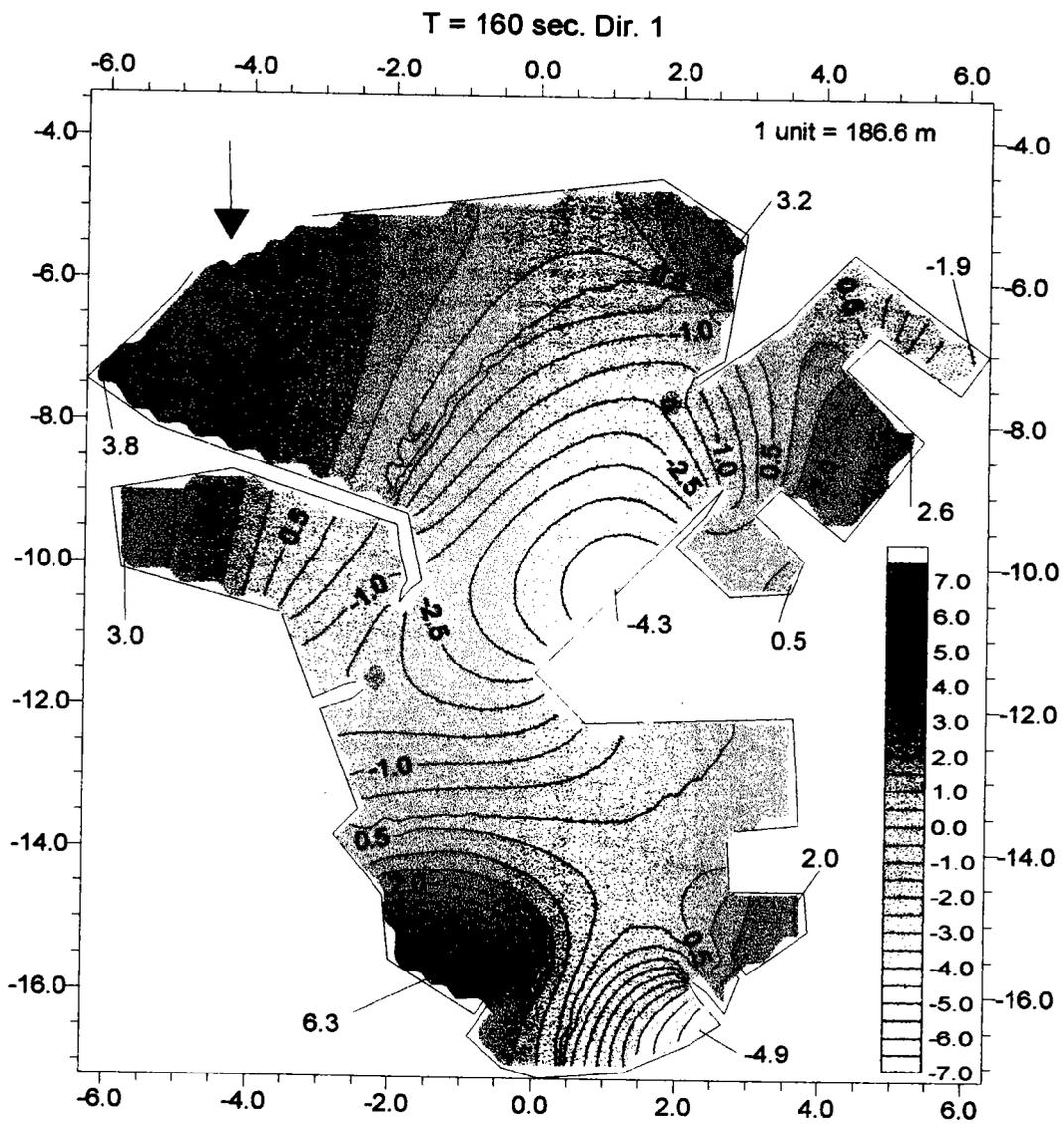


圖 4-2-4a 蘇澳港現沉港池波浪分佈(T=160sec, SE)

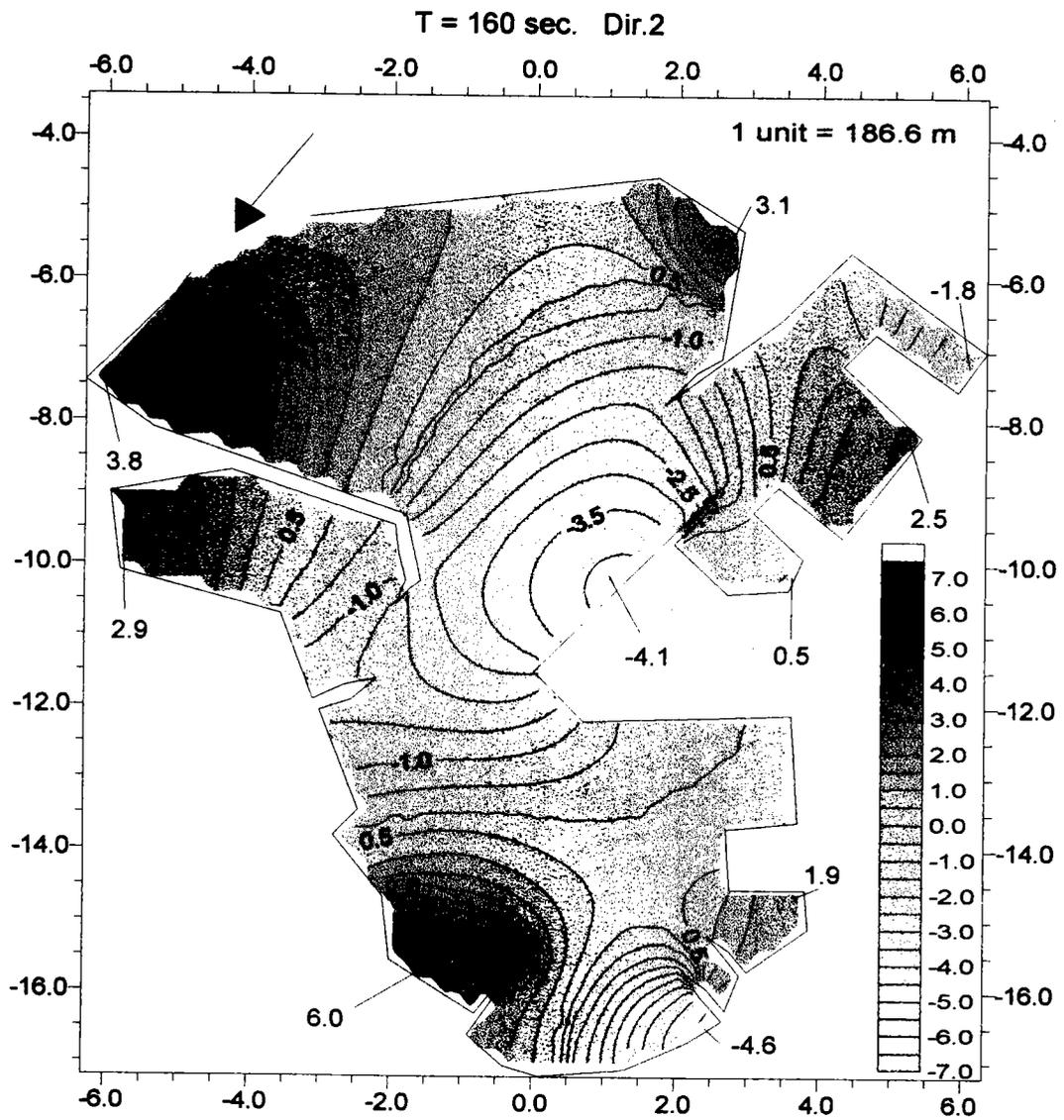


圖 4-2-4b 蘇澳港現況港池波浪分佈(T=160sec, SSE)

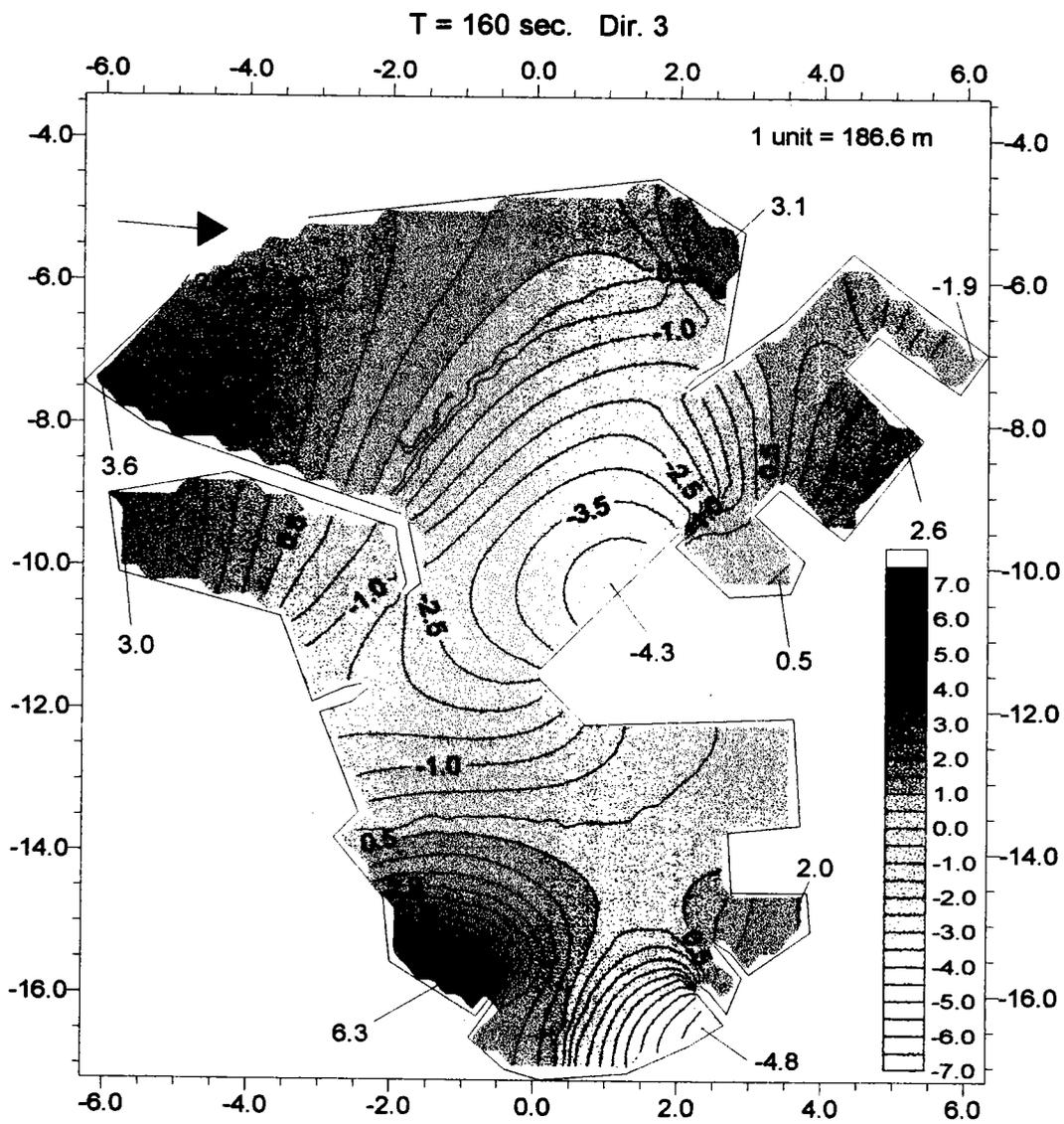


圖 4-2-4c 蘇澳港現況港池波浪分佈(T=160sec, NE)

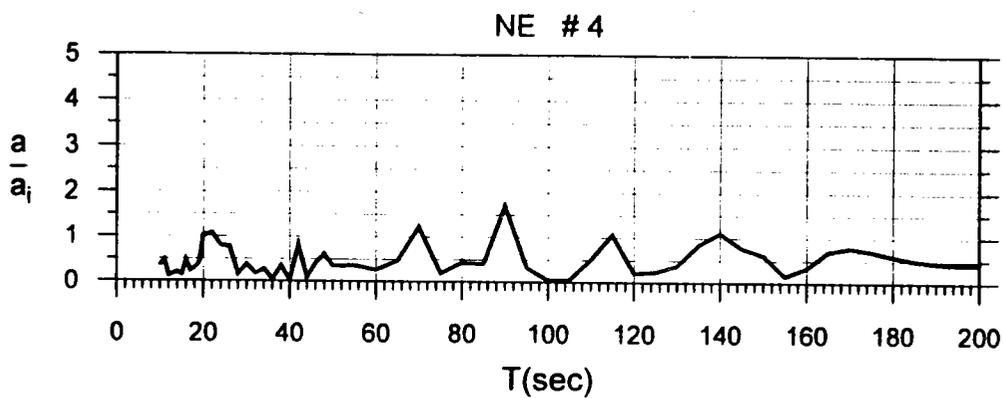
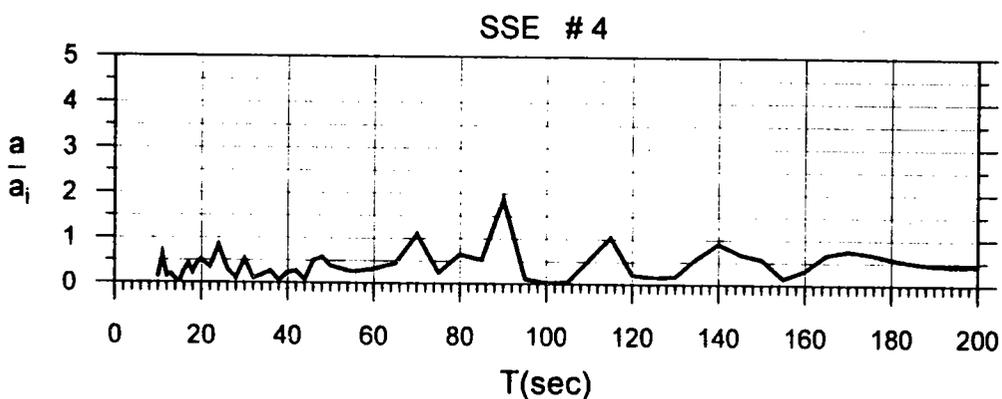
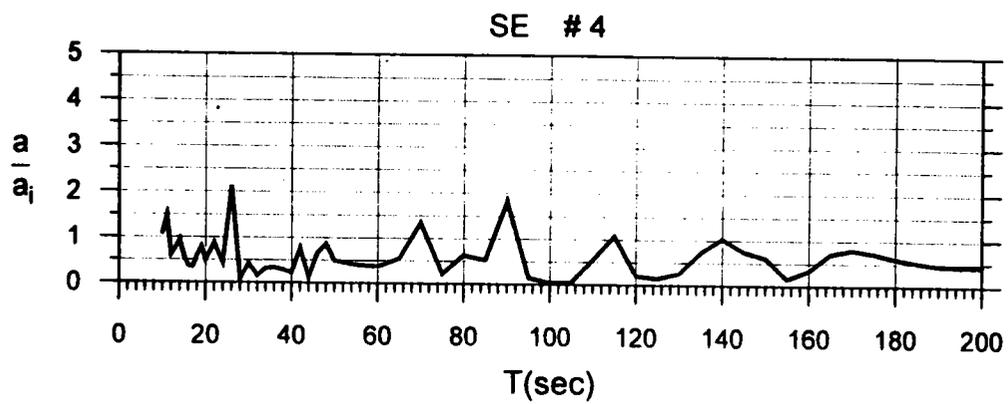
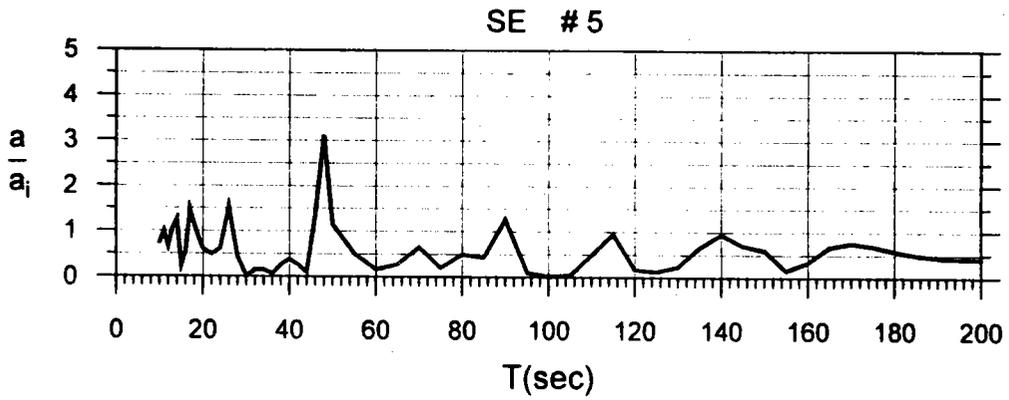
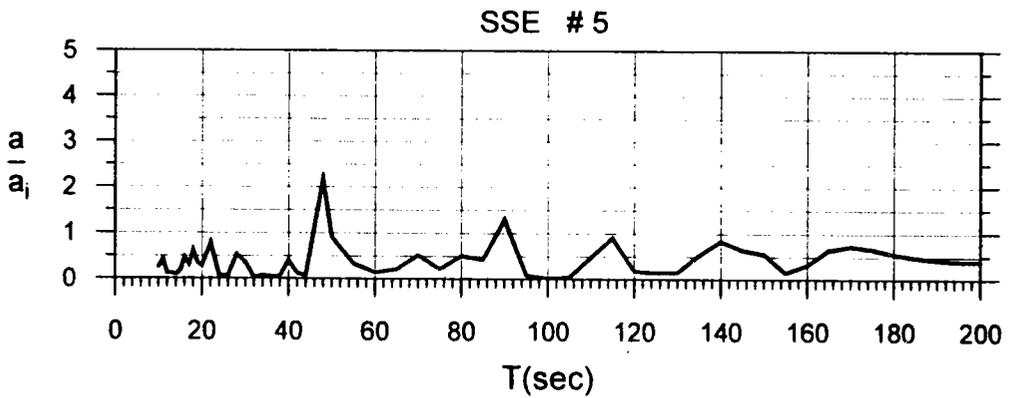


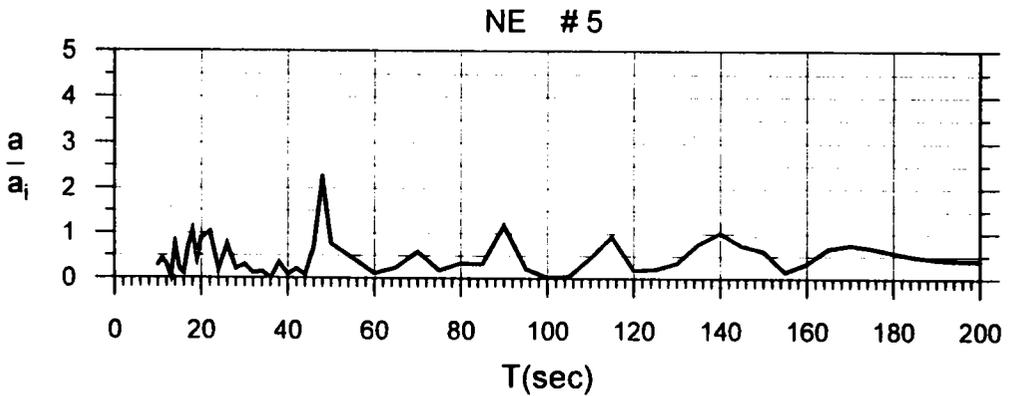
圖 4-2-5 蘇澳港現況 4 號碼頭波浪反應曲線
 (a) 波浪 SE 方向 b 波浪 SSE 方向 c 波浪 NE 方向)



(a)



(b)



(c)

圖 4-2-6 蘇澳港現況 5 號碼頭波浪反應曲線
(a 波浪 SE 方向 b 波浪 SSE 方向 c 波浪 NE 方向)

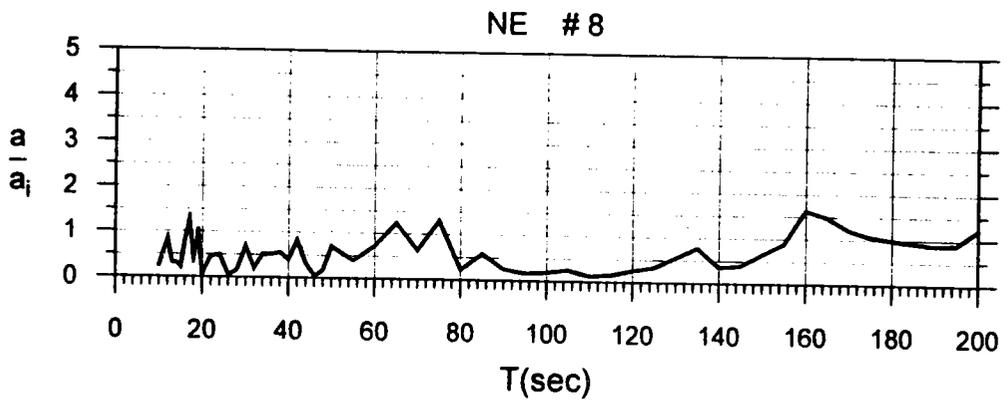
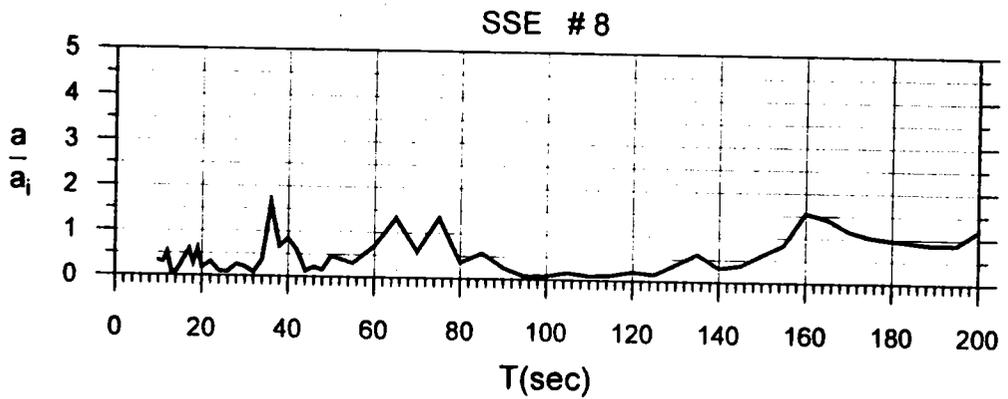
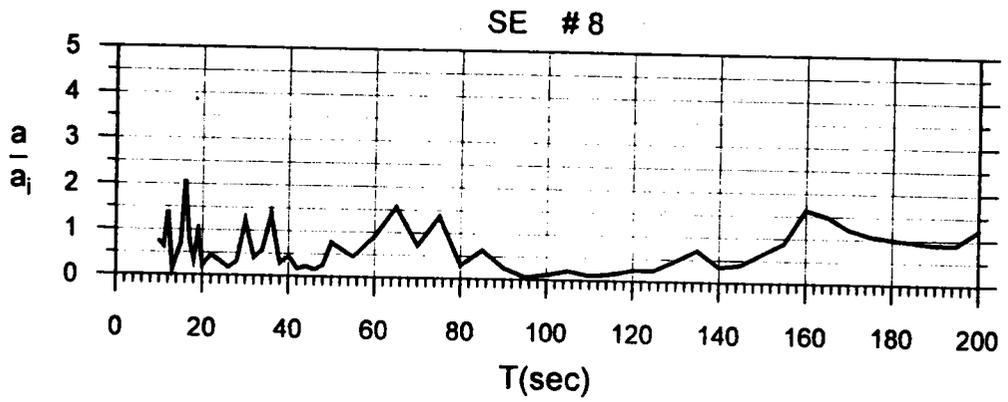


圖 4-2-7 蘇澳港現況 8 號碼頭波浪反應曲線
(a 波浪 SE 方向 b 波浪 SSE 方向 c 波浪 NE 方向)

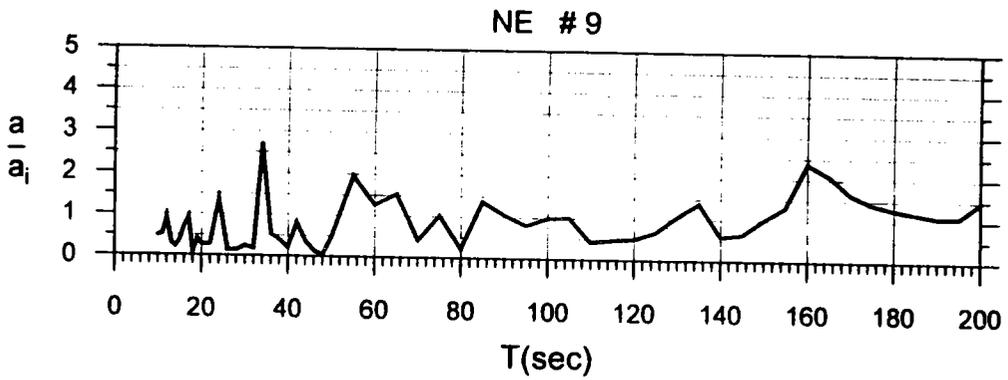
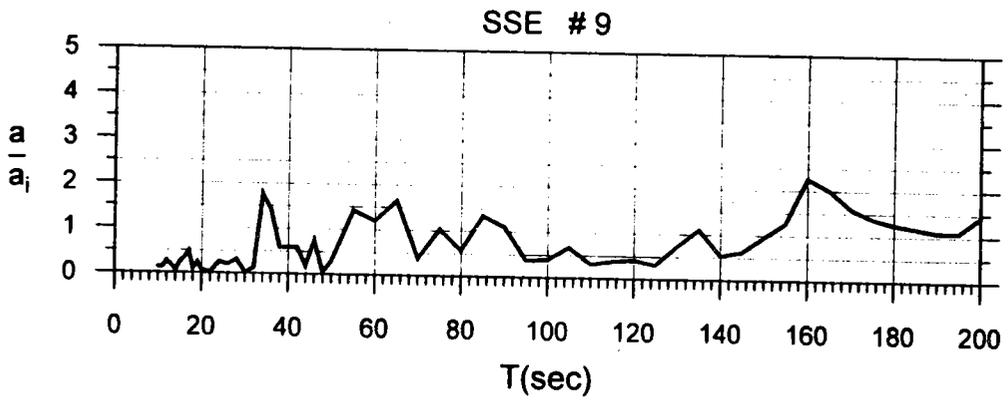
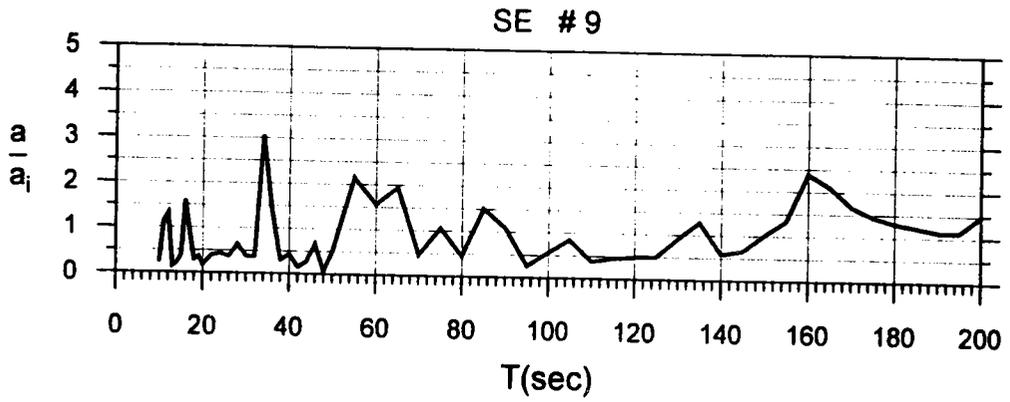
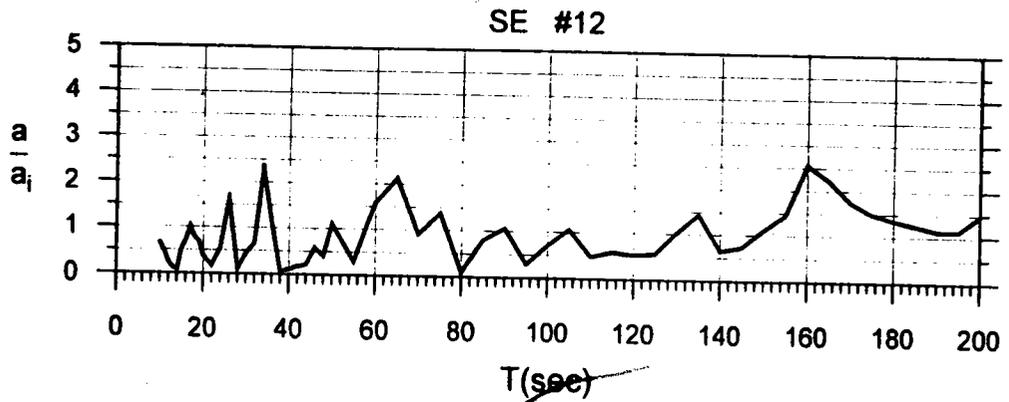
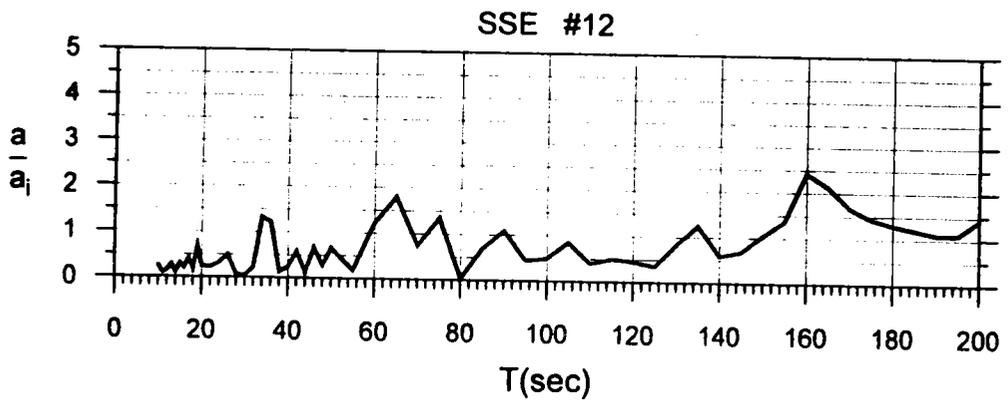


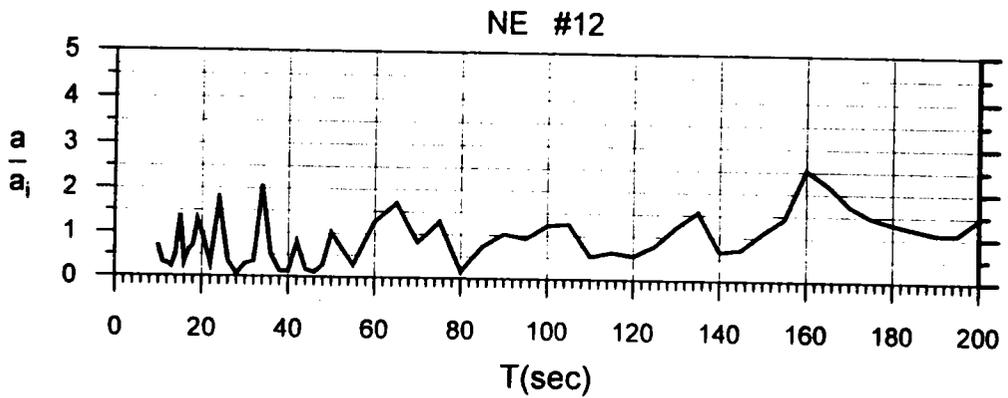
圖 4-2-8 蘇澳港現況 9 號碼頭波浪反應曲線
 (a 波浪 SE 方向 b 波浪 SSE 方向 c 波浪 NE 方向)



(a)



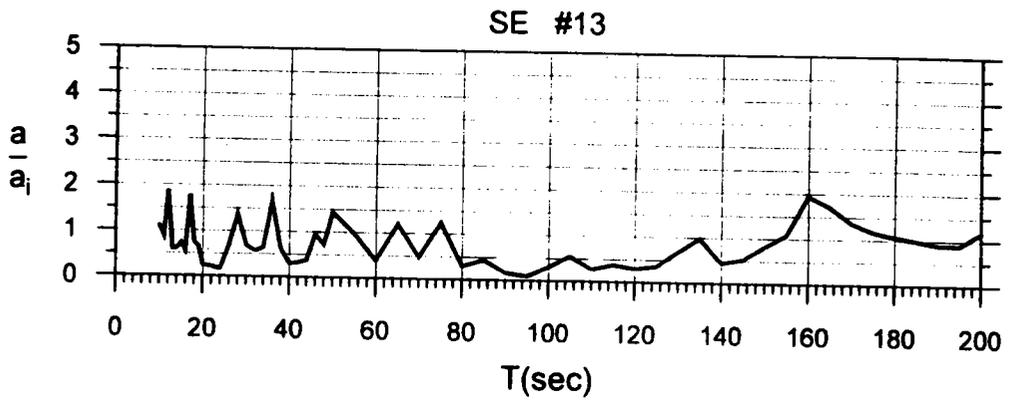
(b)



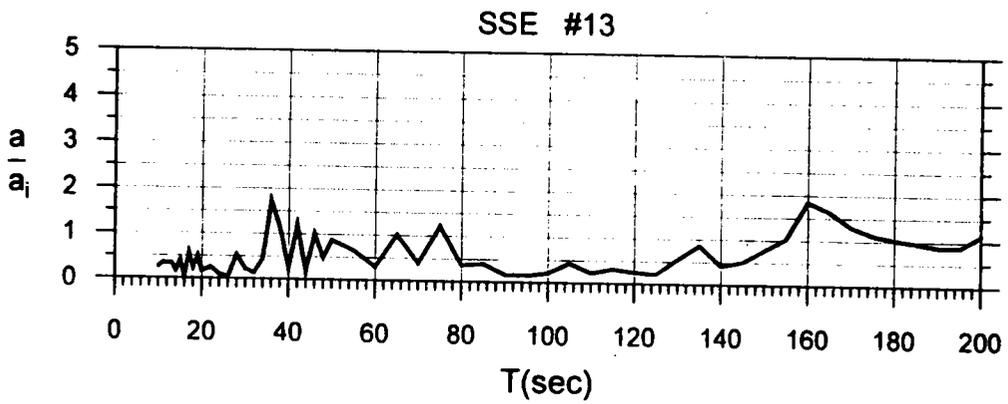
(c)

圖 4-2-9 蘇澳港現況 12 號碼頭波浪反應曲線

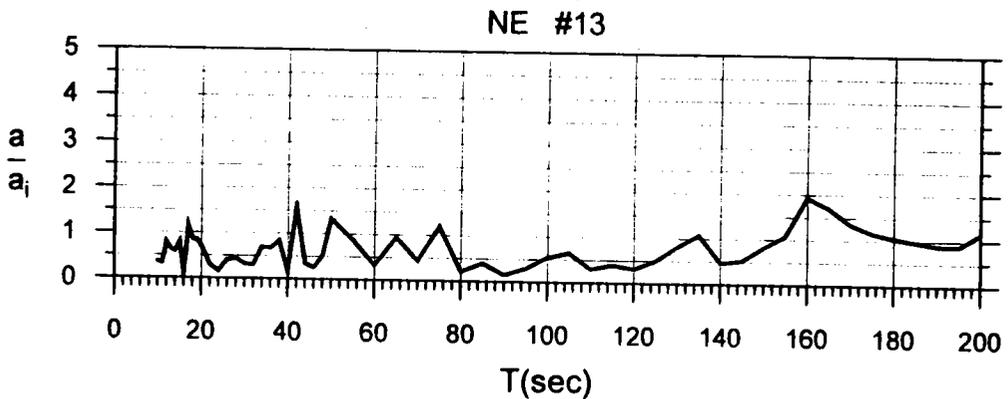
(a) 波浪 SE 方向 (b) 波浪 SSE 方向 (c) 波浪 NE 方向



(a)



(b)



(c)

圖 4-2-10 蘇澳港現況 13 號碼頭波浪反應曲線
(a 波浪 SE 方向 b 波浪 SSE 方向 c 波浪 NE 方向)

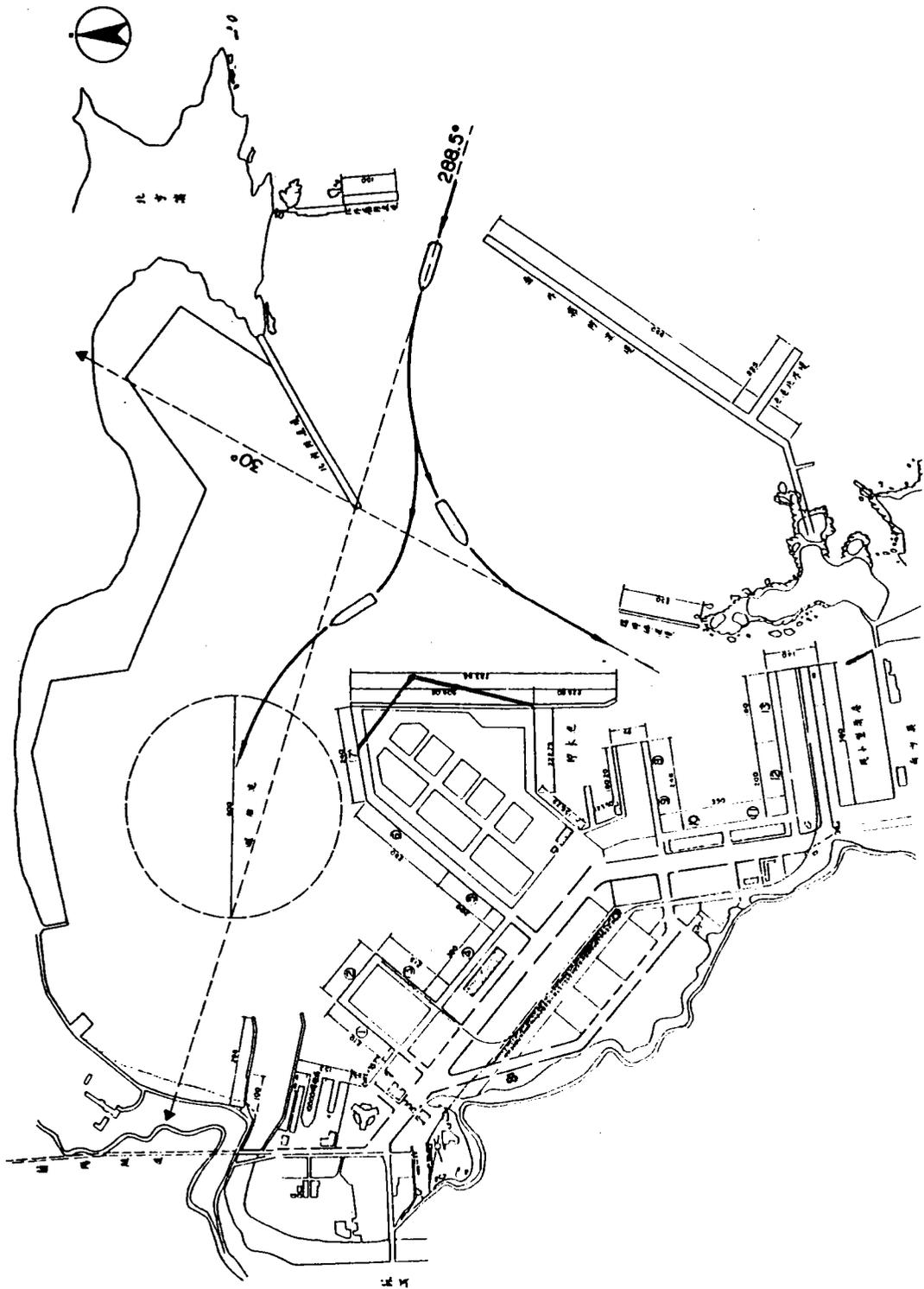


FIG. 6-4-2

圖 4-3-1 蘇澳港本研究改善配置圖

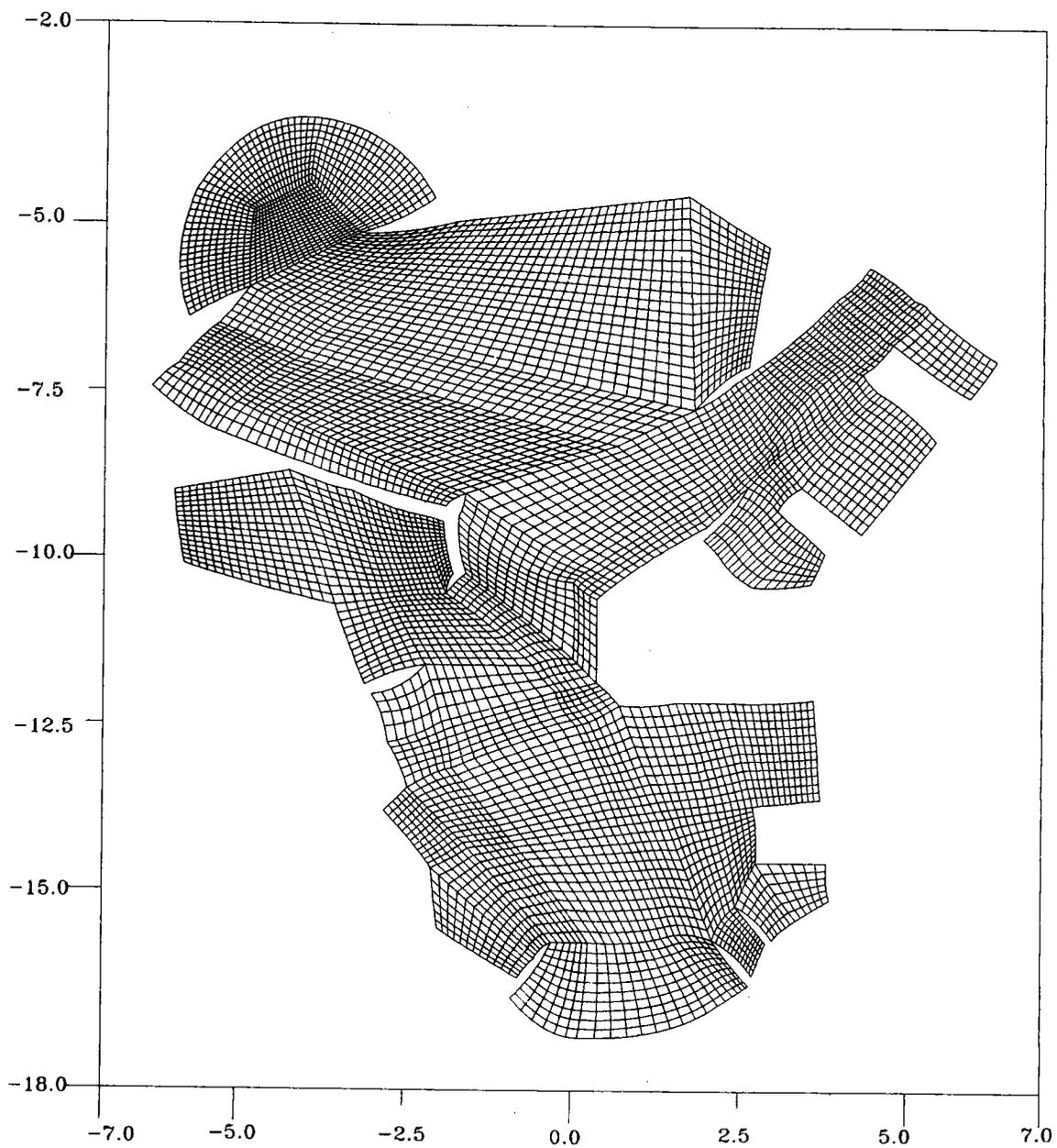
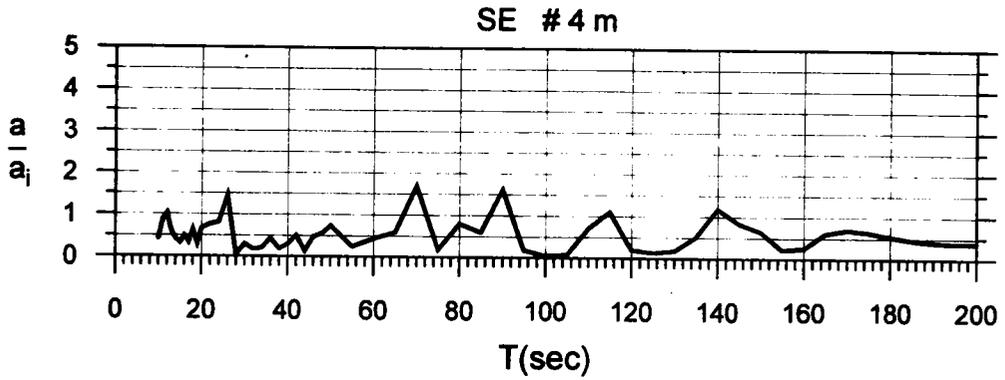
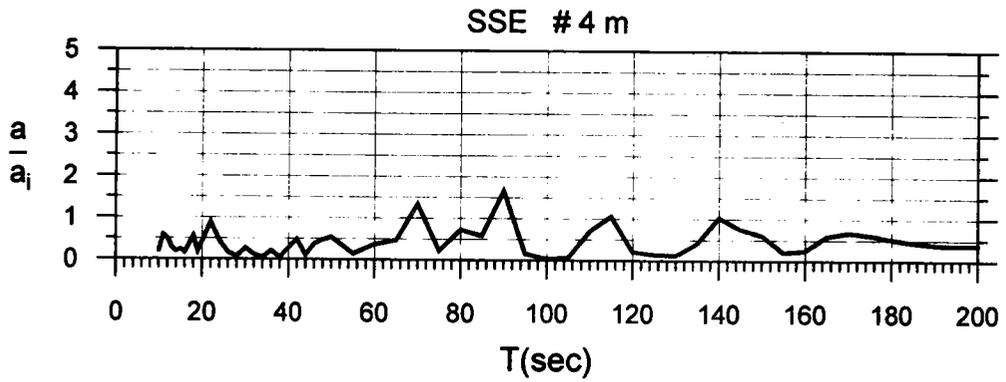


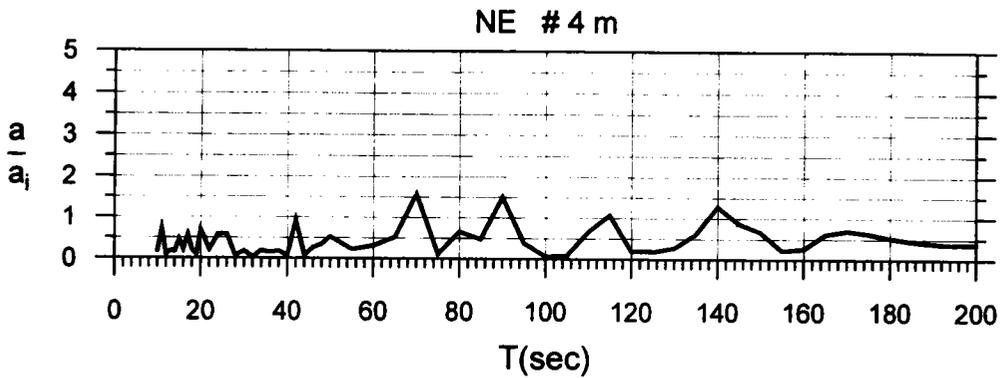
圖 4-3-2 蘇澳港本研究改善方案有限元素格網



(a)

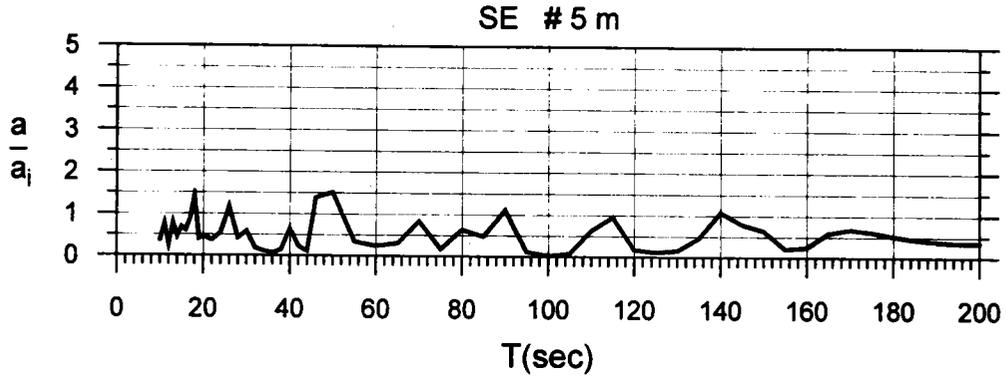


(b)

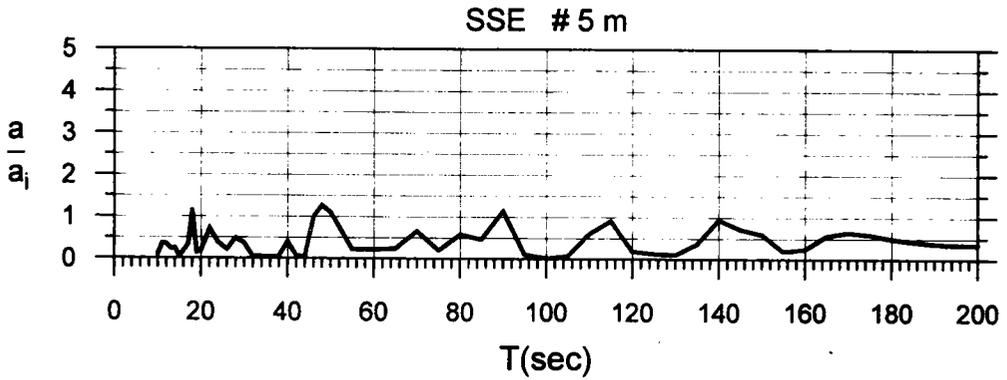


(c)

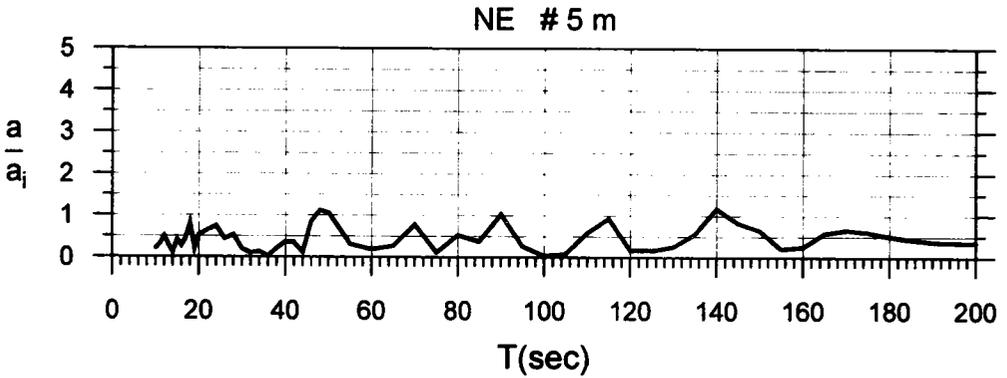
圖 4-3-3 蘇澳港本研究改善方案 4 號碼頭波浪反應曲線
(a 波浪 SE 方向 b 波浪 SSE 方向 c 波浪 NE 方向)



(a)

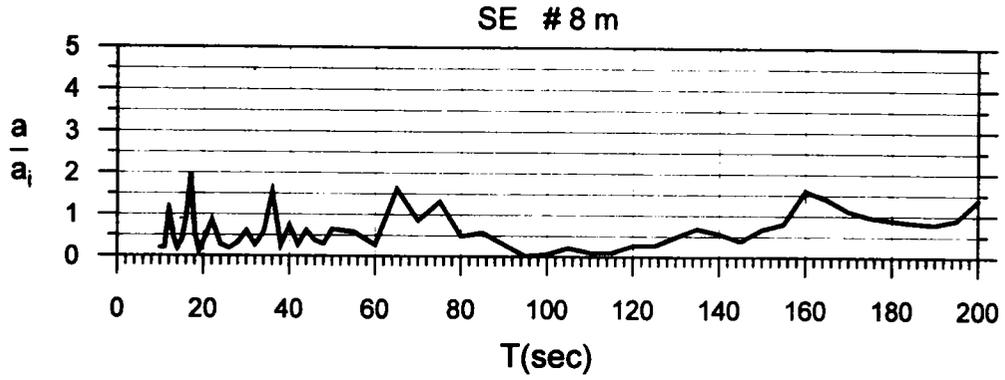


(b)

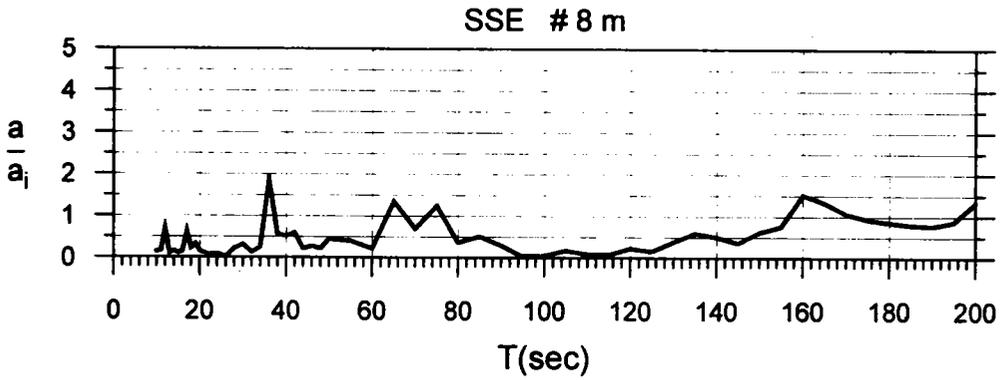


(c)

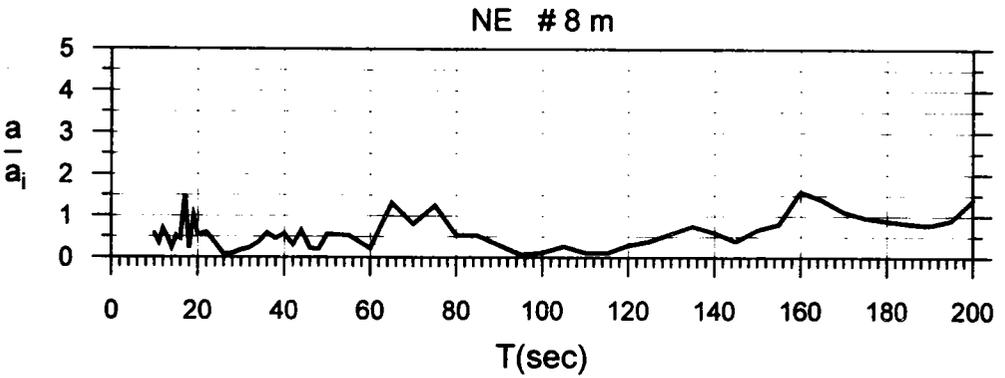
圖 4-3-4 蘇澳港本研究改善方案 5 號碼頭波浪反應曲線
(a 波浪 SE 方向 b 波浪 SSE 方向 c 波浪 NE 方向)



(a)

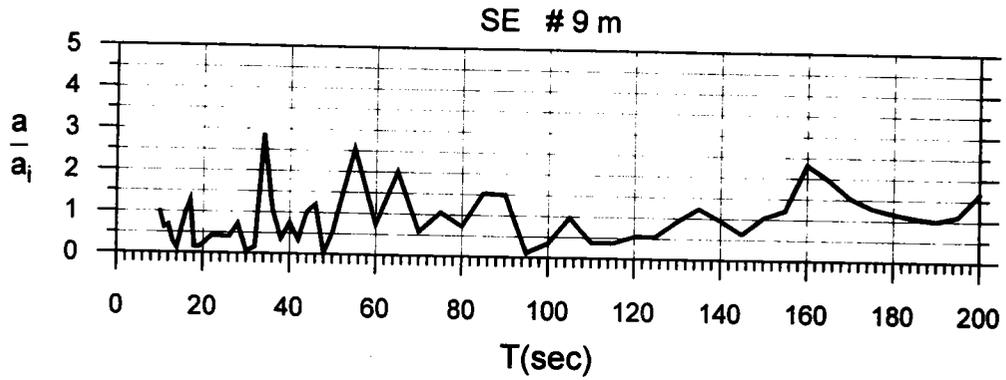


(b)

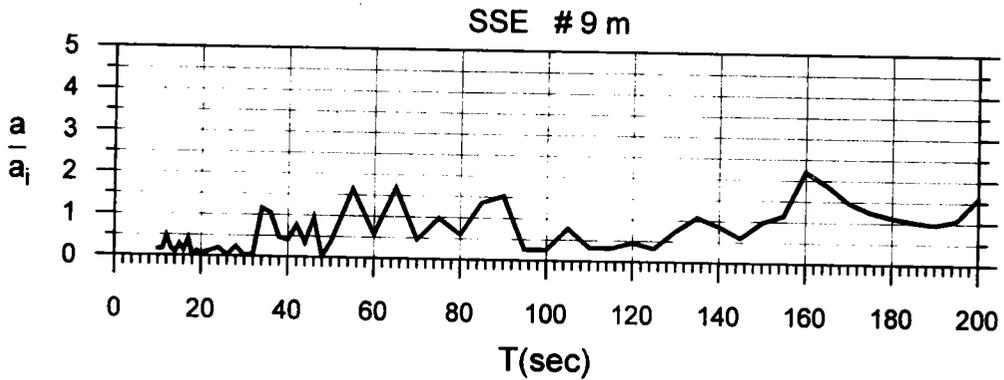


(c)

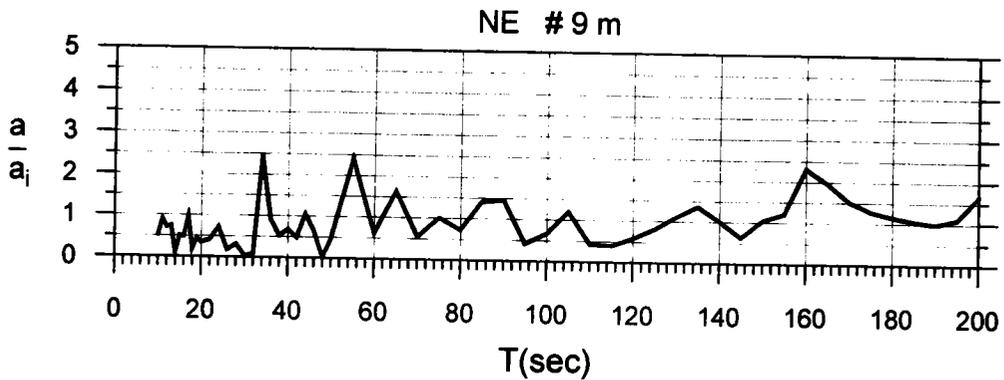
圖 4-3-5 蘇澳港本研究改善方案 8 號碼頭波浪反應曲線
(a 波浪 SE 方向 b 波浪 SSE 方向 c 波浪 NE 方向)



(a)

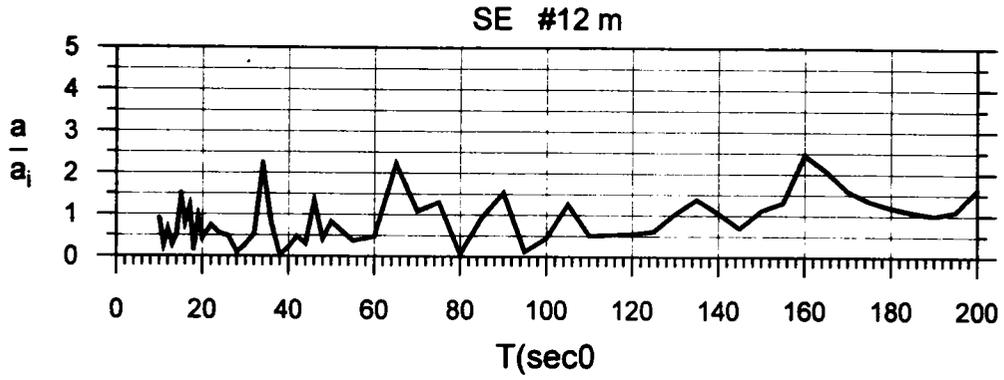


(b)

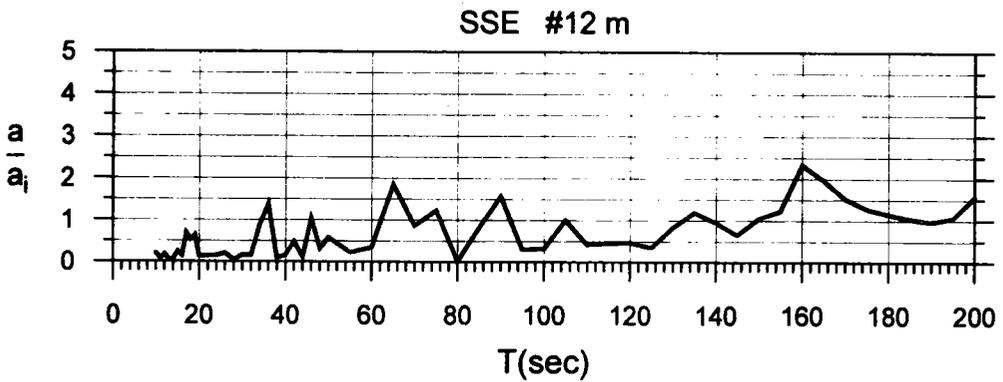


(c)

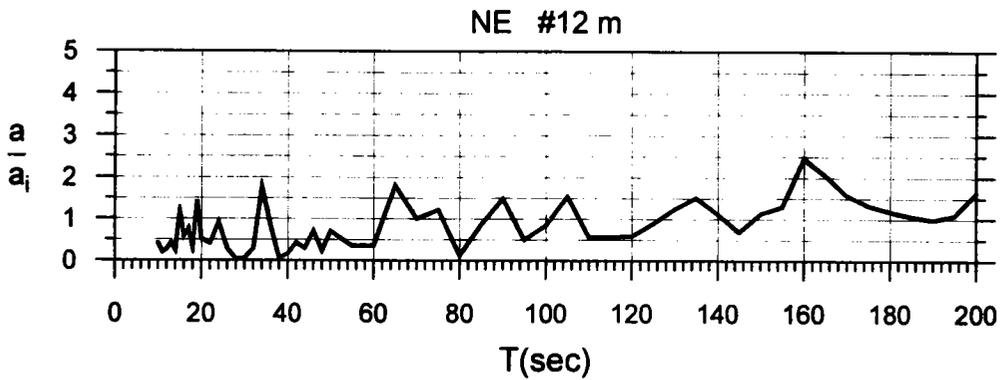
圖 4-3-6 蘇澳港本研究改善方案 9 號碼頭波浪反應曲線
(a 波浪 SE 方向 b 波浪 SSE 方向 c 波浪 NE 方向)



(a)



(b)



(c)

圖 4-3-7 蘇澳港本研究改善方案 12 號碼頭波浪反應曲線
(a 波浪 SE 方向 b 波浪 SSE 方向 c 波浪 NE 方向)

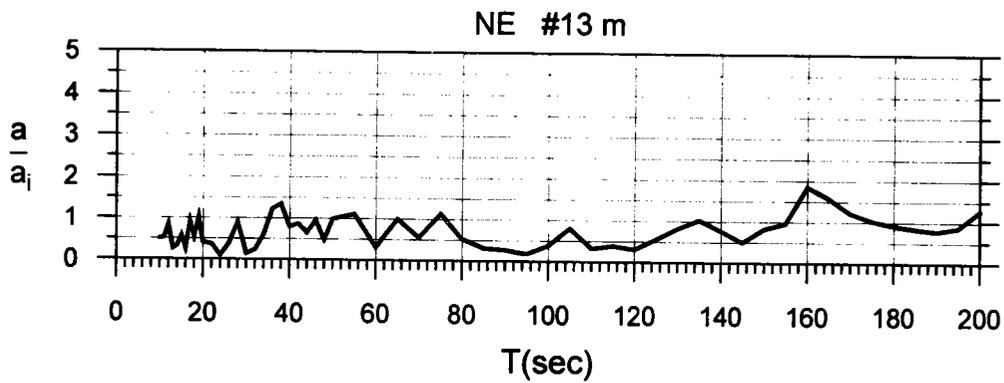
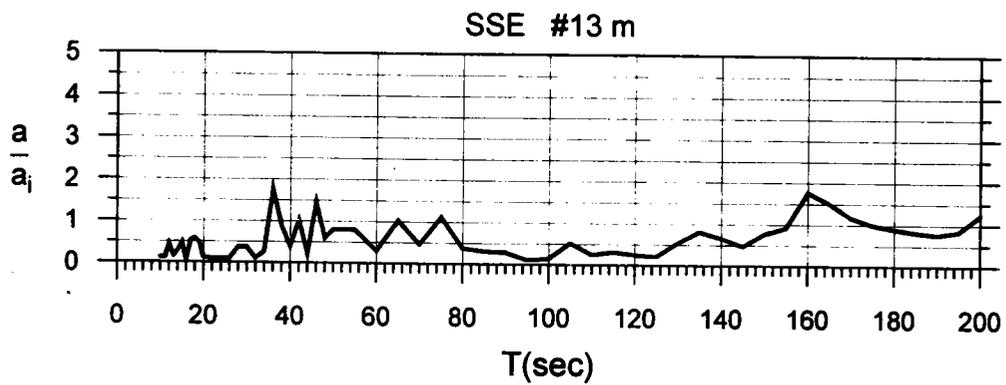
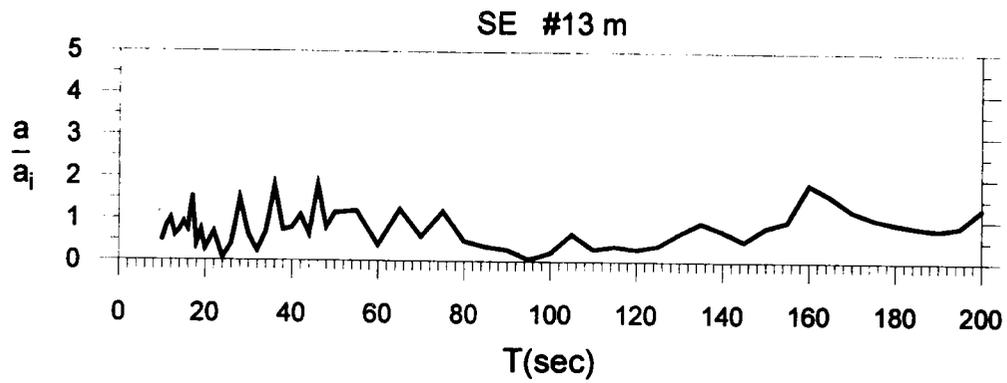


圖 4-3-8 蘇澳港本研究改善方案 13 號碼頭波浪反應曲線
(a 波浪 SE 方向 b 波浪 SSE 方向 c 波浪 NE 方向)

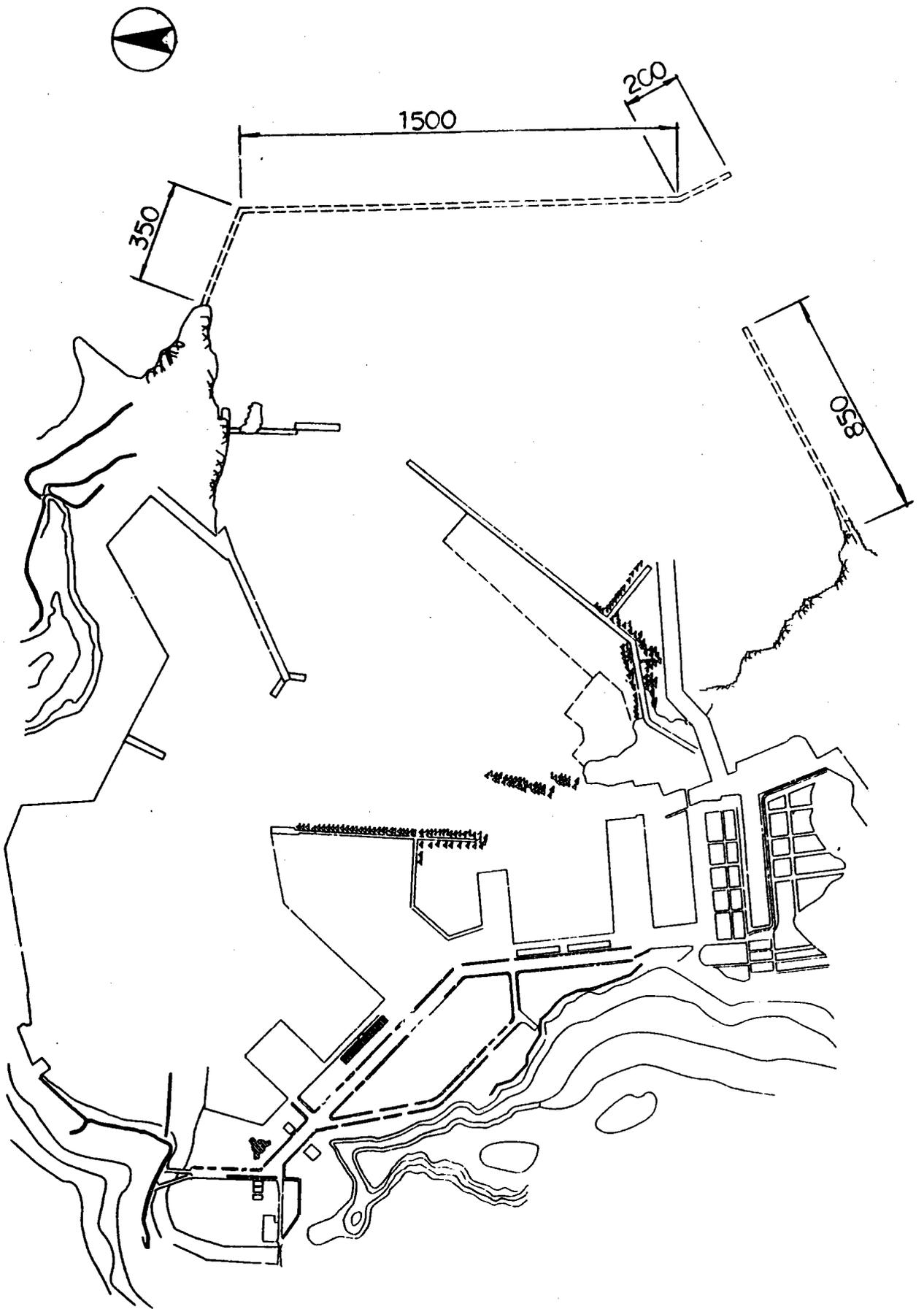


圖 4-4-1 蘇澳港遠期規劃改善方案配置圖

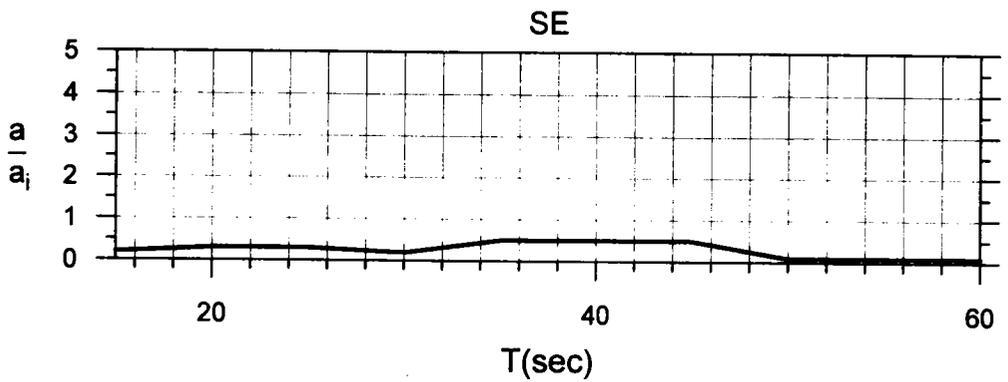
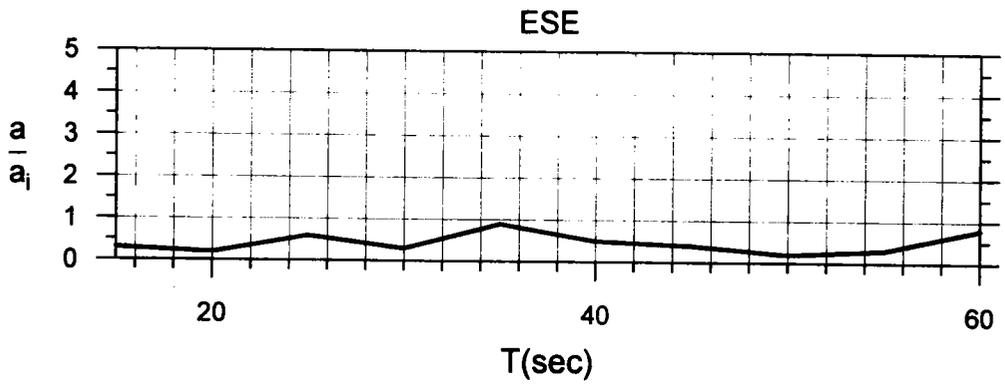
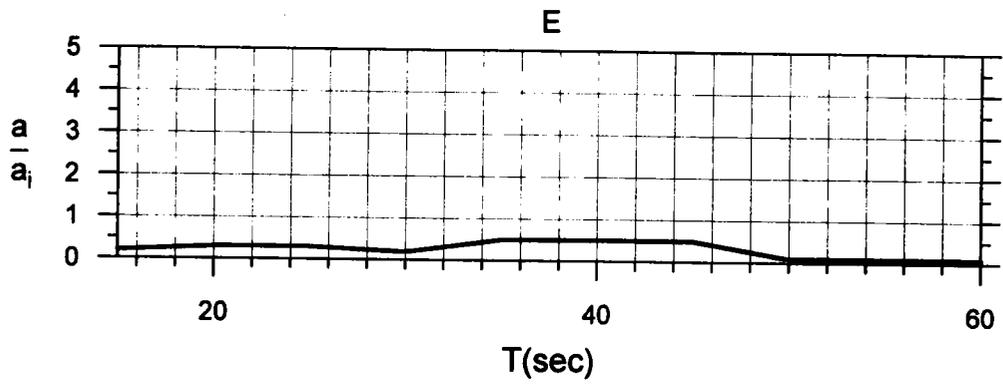
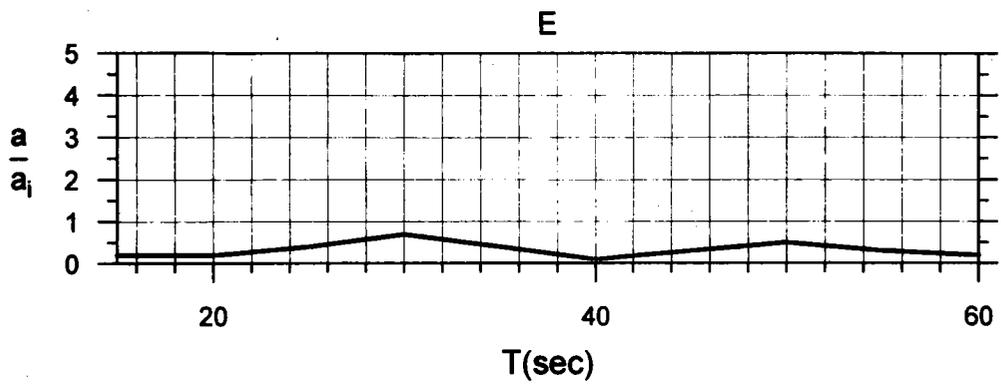
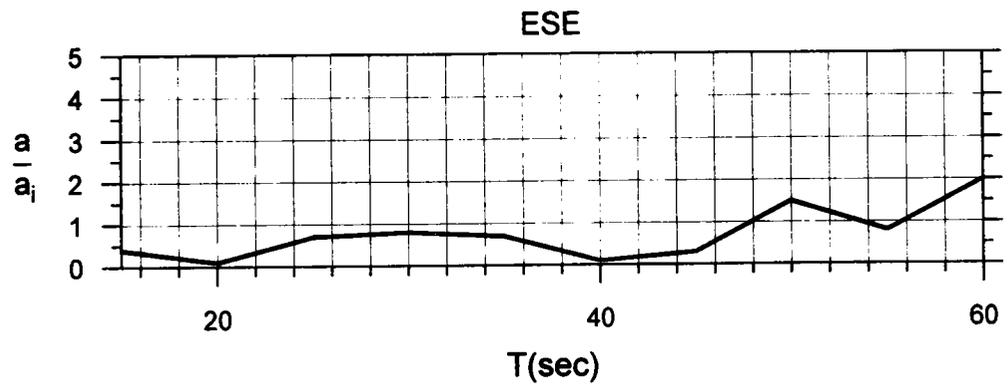


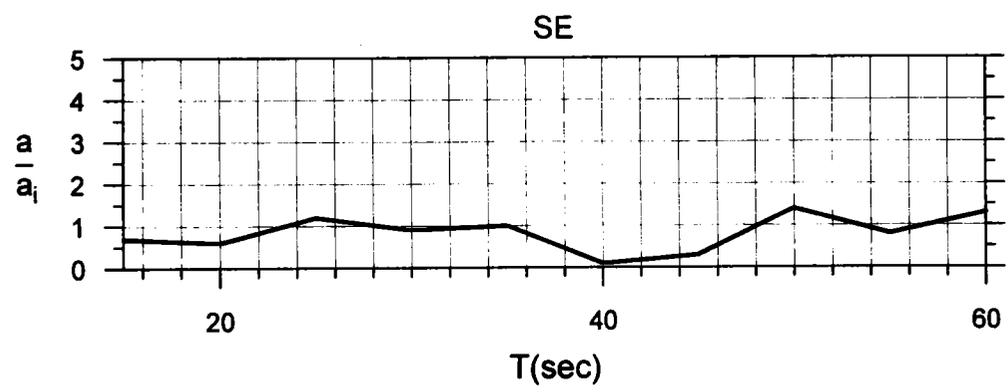
圖 4-4-2 蘇澳港遠期規劃改善方案於商港一之波浪反應曲線圖



(a)

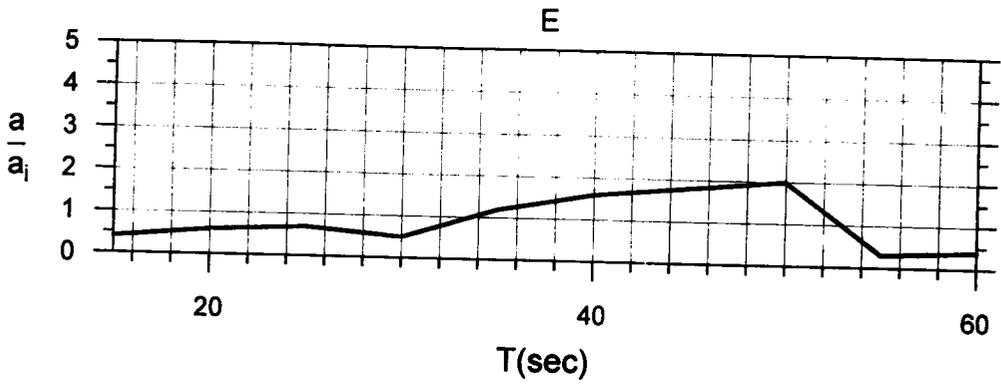


(b)

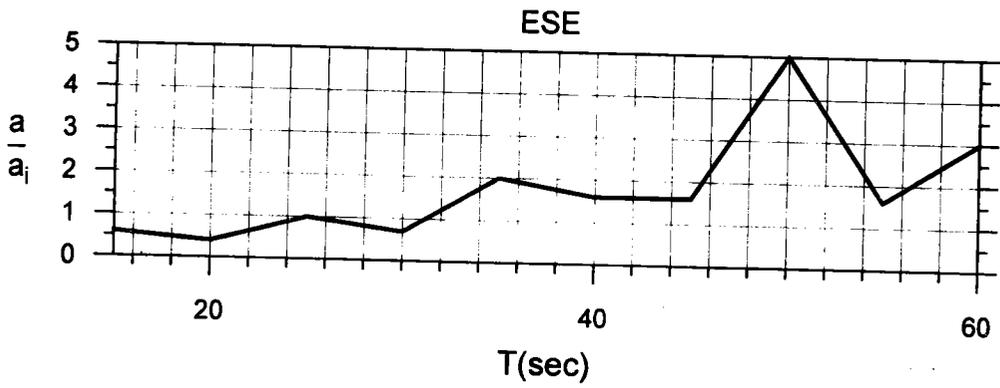


(c)

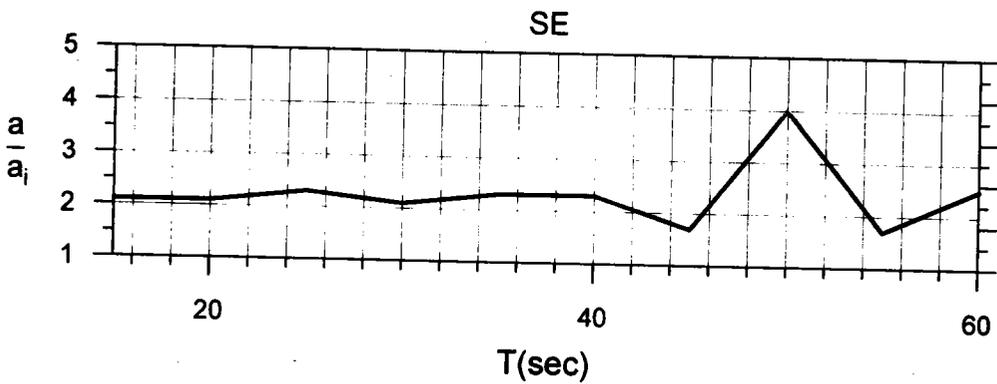
圖 4-4-3 蘇澳港遠期規劃改善方案於商港二之波浪反應曲線圖



(a)

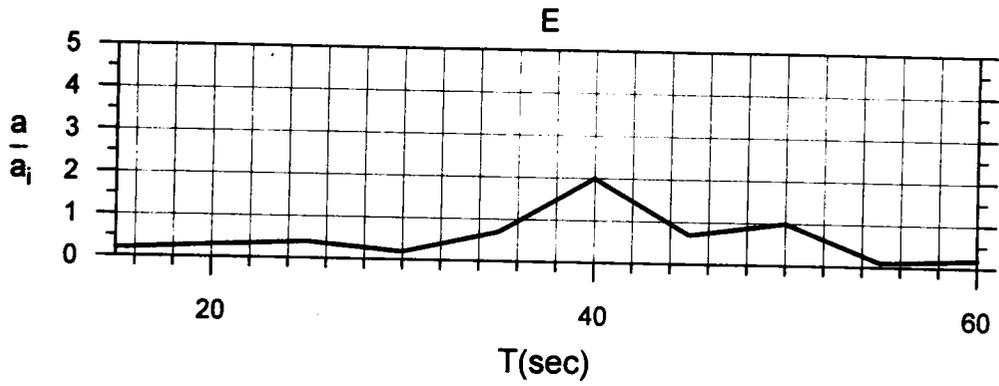


(b)

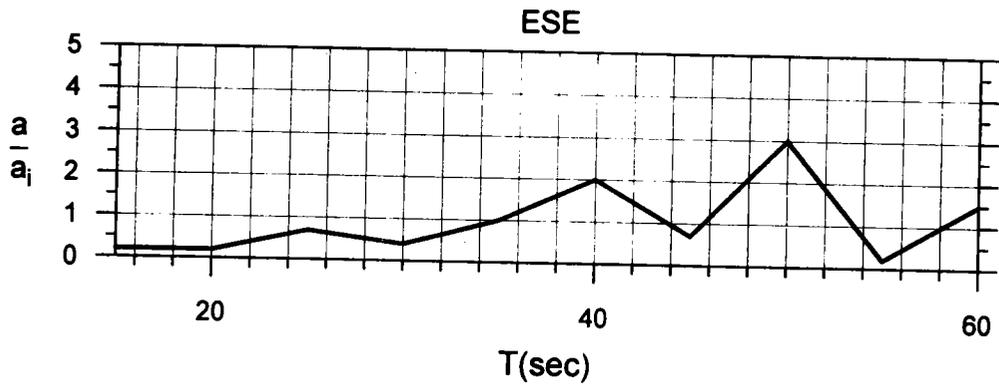


(c)

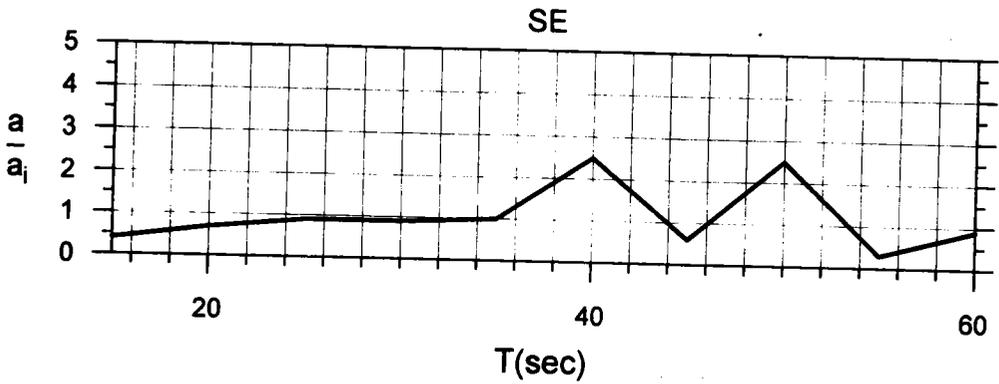
圖 4-4-4 蘇澳港遠期規劃改善方案於輸煤碼頭區之波浪反應曲線圖



(a)



(b)



(c)

圖 4-4-5 蘇澳港遠期規劃改善方案於北方澳軍港區內之波浪反應曲線圖

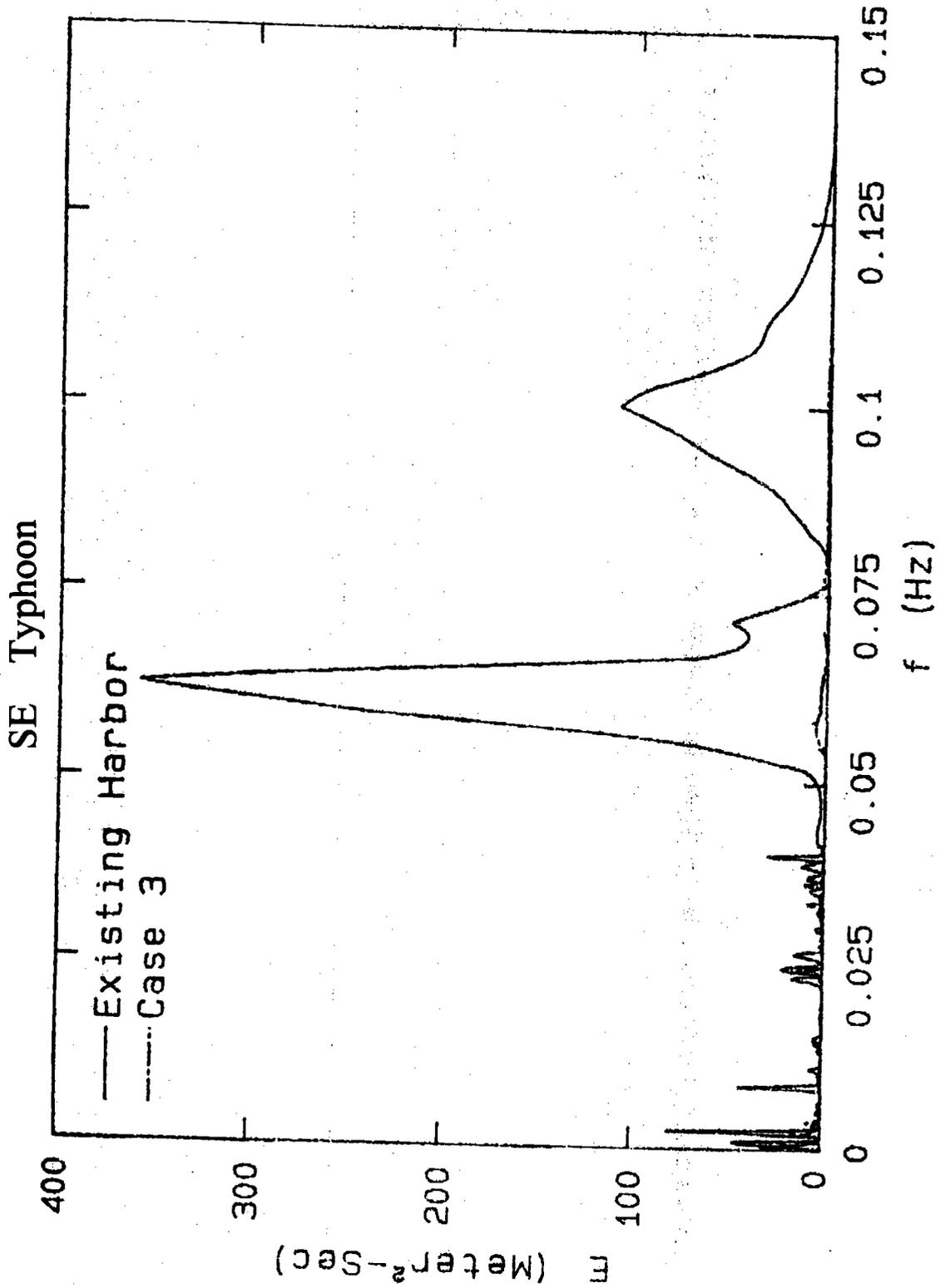


圖 4-4-6 蘇澳港遠期規劃改善方案與現況配置於 12 和 13 號碼頭區颶風波浪譜比較圖

SE Post-Typhoon

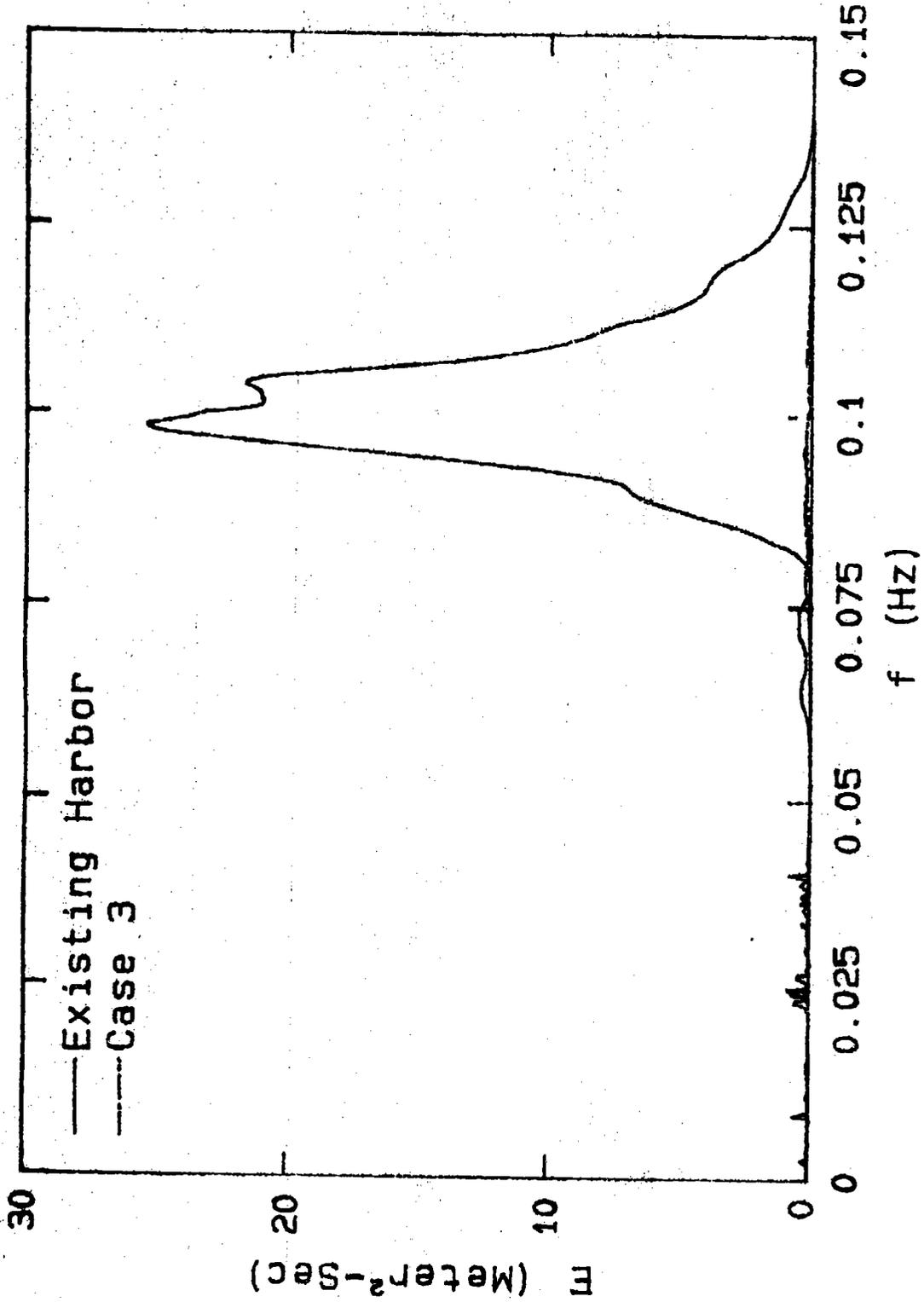


圖 4-4-7 蘇澳港遠期規劃改善方案與現況配置於 12 和 13 號碼頭區颱風波浪譜比較圖(颱風過後)

參考文獻

1. Chen, H.S. and Mei, C.C., Oscillations and Wave Forces in an Offshore Harbor, Ralph M. Parsons Laboratory, Report No. 190, MIT, 1974.
2. Ippen, A.T. and Goda, Y., Wave Induced Oscillations in Harbors : The Solution for a Rectangular Harbor Connected to the Open-Sea, Report No. 59, Hydrodynamics Laboratory, MIT, 1963.
3. Lee, J.J., Wave-induced Oscillations in Harbours of Arbitrary Shape, Report KH-R-20, W. M. Keck Laboratory of Hydraulics and Water Resources, California, Institute of Technology, Berkeley, Calif, 1969.
4. Lee, J.J., Wave-induced Oscillations in Harbours of Arbitrary Geometry, J.F.M., Vol. 45, pp. 375-394, 1971.
5. Tsay, T.K. and Liu, P. L-F., A Finite Element Model for Wave Refraction and Diffraction, Appl. Ocean Research, Vol. 5, pp. 30-37, 1983.
6. 蘇青和，多孔消波體波能消散解析及其應用於港池之研究，國立成功大學水利及海洋工程研究所博士論文，中華民國82年6月。
7. 蘇清和、陳冠宇，消波式岸壁港池之波場數值推算研究，港灣技術研究所報告，84-研(六)-1，中華民國84年6月。
8. 蘇澳港消波問題研究（第三期），中華顧問公程司報告，中華民國79年10月。